



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR
FADIGA EM CAÇAMBAS DE RECUPERADORAS DE
MINÉRIO**

WARLEY LOPES MOREIRA

Belo Horizonte, 06 de Fevereiro de 2018

WARLEY LOPES MOREIRA

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR
FADIGA EM CAÇAMBAS DE RECUPERADORAS DE
MINÉRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Manufatura e Materiais

Orientador (a): Prof. Ernani Sales Palma

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018



Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR
FADIGA EM CAÇAMBAS DE RECUPERADORAS DE
MINÉRIO**

WARLEY LOPES MOREIRA

Dissertação/Tese defendida e aprovada em 06, de Fevereiro de 2018, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre/Doutor em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Engenharia de Manufatura e Materiais".

Prof. Dr. Ernani Sales Palma – UFMG – Orientador

Prof. Dr. Paulo José Modenesi – UFMG – Examinador

Prof. Dr. Claysson Vimieiro – UFMG – Examinador

M838e

Moreira, Warley Lopes.

Estudo da propagação de trincas por fadiga em caçambas de recuperadoras de minério [manuscrito] / Warley Lopes Moreira. – 2018. 89 f., enc.: il.

Orientador: Emani Sales Palma.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 83-89.

Bibliografia: f. 78-82.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fadiga - Teses. 3. Minérios de ferro - Teses. 4. Mecânica da fratura - Teses. I. Palma, Emani Sales, 1959-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpqgmec@demec.ufmg.br

**"ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA EM
CAÇAMBAS DE RECUPERADORAS DE MINÉRIO"**

WARLEY LOPES MOREIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Engenharia de Manufatura e Materiais".

Dissertação aprovada no dia 06 de fevereiro de 2018.

Por:

Prof. Ernani Sales Palma

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Paulo José Modenesi

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/UFMG

Prof. Claysson Bruno Santos Vimeiro

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

*Dificuldades existem na vida de
todo mundo. A maneira de
enfrentá-las é que faz a diferença.*

(Warley Moreira)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido o dom da vida, ter me dado saúde, sabedoria e perseverança para não desanimar diante das dificuldades e concluir este trabalho.

A meus queridos pais Rivail e Bernardete, a quem devo tudo que sou e por sempre terem me guiado pelos caminhos corretos e me apoiado em tudo que fiz.

À minha esposa Priscila, pelo apoio e incentivo prestados em todos os momentos deste trabalho, por ter acreditado e me ajudado a realizar este sonho.

Ao meus irmãos Leonardo e Natália, a quem sempre procurei multiplicar meus melhores exemplos de vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ernani Sales Palma, pelos ensinamentos, estímulo e orientação.

Ao Prof. Dr. Alexandre Bracarense, pelas dicas e apoio com o laboratório de ensaios de fadiga.

Ao Prof. Dr. Ariel Rodrigues Arias, pelo apoio e compartilhamento do seu conhecimento sobre o tema do trabalho.

Ao Doutorando Luis Henrique, pelo apoio e ensinamentos durante os ensaios de laboratório.

Ao Técnico de Inspeção Preditiva da Vale, Helton Costa, pelo apoio na realização dos ensaios não destrutivos em campo.

À Technotest, nas pessoas do Mateus e Mariana Coutinho, pelo apoio com o aparelho de ultrassom.

À KeL Mecânica, nas pessoas do Marco Aurélio, Adriano Gomes e Rudimar pelo apoio na confecção dos corpos de prova.

Aos funcionários do PPGEM UFMG, pelo apoio na resolução das questões administrativas durante a trajetória na pós graduação.

Aos professores do Programa de Pós Graduação da Engenharia Mecânica da UFMG, pelos ensinamentos transmitidos.

A todos, muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	13
NOMENCLATURAS	15
RESUMO	16
ABSTRACT	17
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Justificativa	18
1.2 Objetivos	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Principais equipamentos da indústria da mineração	20
2.1.1 Recuperadoras de minério	21
2.2 Falhas em componentes mecânicos	23
2.2.1 Falhas – definições e generalidades.....	23
2.3 Falhas por fadiga.....	25
2.3.1 Método S-N – Fadiga controlada por tensão	28
2.3.2 Método ϵ N – Fadiga controlada por deformação	29
2.3.3 Acúmulo de dano – Carregamentos aleatórios	30
2.3.4 Método Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE) – Propagação de trincas pré existentes	32
2.3.5 Principais falhas em equipamentos de mineração	41
2.3.6 Falhas em recuperadoras de minério	45
2.4 Ensaio não destrutivos.....	50
2.4.1 Conceitos preliminares	50
2.4.2 Ensaio por ultrassom	51
3 MATERIAL E METODOLOGIA	54
3.1 Ensaio não destrutivo em uma caçamba	54
3.2 Ensaio de fadiga de amostras obtidas da caçamba em operação	58
3.2.1 Máquina de ensaio de fadiga universal.....	58
3.2.2 Sistema de aquisição de dados.....	59
3.2.3 Corpos de prova.....	60

3.2.4	Pré-trinca por fadiga	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	Resultados da análise por elementos finitos	64
4.2	Resultados dos ensaios de ultrassom	65
4.3	Propagação da trinca vs número de ciclos – Análise ultrassom	68
4.4	Propagação da trinca vs número de ciclos – Ensaios em laboratório	69
4.5	Taxa de crescimento da trinca em função da variação da intensidade de tensões - da/dN vs Δk	71
4.6	Comparação dos valores de propagação da trinca vs número de ciclos – Análise pelo ensaio de ultrassom e análise pelo ensaio de laboratório.....	75
5	CONCLUSÕES.....	78
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
	REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS	80
	ANEXO A	85
	ANEXO B	87
	ANEXO C	88

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Recuperadora de minério, visão geral.	20
FIGURA 2.2 – Caçamba de recuperadora de minério, geometria.	21
FIGURA 2.3 – Representação esquemática da definição de um sistema e a representação da falha.	22
FIGURA 2.4 – Estágios do processo de fadiga. a) nucleação da trinca, b) propagação da trinca,.....	24
FIGURA 2.5 – Tensões atuantes: Definições.	24
FIGURA 2.6 – Curvas S-N para (a) um material que exibe um limite de resistência a fadiga (b) um material que não exibe um limite de resistência a fadiga.	27
FIGURA 2.7 – Comportamento macroscópico de um corpo solicitado por uma carga cíclica. Ensaio com controle de força e deslocamento.....	28
FIGURA 2.8 – Curva S-N do material e carregamento aplicado.....	29
FIGURA 2.9 – Ponto da tensão local próximo a uma trinca típica em coordenadas cilíndricas.	31
FIGURA 2.10 – Modos de carregamento de uma trinca.....	31
FIGURA 2.11 – Crescimento de uma trinca de fadiga considerando 3 diferentes níveis de amplitudes de tensão.....	33
FIGURA 2.12 – Taxa de crescimento de uma trinca da/dN esquematicamente plotada como função da amplitude do fator de intensidade de tensões ΔK em uma escala log-log.	34
FIGURA 2.13 – A influência de $K_{m\acute{a}x}$ na taxa de propagação de trinca em fadiga por estriações para diversos aços.	37
FIGURA 2.14 – Influência da microestrutura na velocidade de propagação de trincas de fadiga nos aços.....	38
FIGURA 2.15 – Comparação da taxa de propagação de trinca em fadiga para um aço perlítico com espessuras de 1,5; 8 e 19 mm.....	39
FIGURA 2.16 – FTA típico de um equipamento da indústria da mineração.....	40
FIGURA 2.17 – Quebra do elo da corrente de um alimentador de sapatas.	43
FIGURA 2.18 – Quebra do eixo motriz de um alimentador.	43
FIGURA 2.19 – Fratura frágil no cubo da roda de caçamba.	46
FIGURA 2.20 – Reforço estrutural para a roda que falhou em serviço.	46
FIGURA 2.21 – Fratura na caçamba provocada por propagação de trincas de fadiga.	47
FIGURA 2.22 – a) Emissão do pulso de ultrassom; b) eco gerado pelo reflexo da onda na descontinuidade; c) inspeção de peça por meio de ultrassom e d) detalhe do gráfico formado pela emissão e eco do ultrassom.....	50
FIGURA 2.23 – a) Configuração do feixe ultra-sônico; b) Ondas de reflexão a partir da superfície da trinca.....	50
FIGURA 3.1 – Fluxograma da metodologia de análise.	52
FIGURA 3.2 – Secção típica da estrutura da caçamba.	53
FIGURA 3.3 – Caçamba ensaiada.	53
FIGURA 3.4 – Aparelho de ultrassom Masterscan 700M.....	54
FIGURA 3.5 – a) Execução do ensaio de ultrassom; b) Ponto da trinca identificada.	56
FIGURA 3.6 – Caçamba utilizada para obtenção de amostras do material para ensaio de fadiga.	56

FIGURA 3.7 – Dimensões do corpo de prova tipo compacto de tração (CT) utilizado nos ensaios de propagação de trinca por fadiga.	58
FIGURA 3.8 – Corpo de prova do tipo tração.	59
FIGURA 3.9 – Corpo de prova montado na máquina de ensaio de fadiga.	60
FIGURA 3.10 – Pré-trinca do corpo de prova.	61
FIGURA 4.1 – Plotagem de tensões para operação com sobrecarga.	63
FIGURA 4.2 – Ponto da trinca identificada.	63
FIGURA 4.3 – Superfície de varredura ultrassom e posicionamento dos cabeçotes.	64
FIGURA 4.4 – Resultado da localização da trinca no eixo Z.	64
FIGURA 4.5 – Esquema de localização da trinca.	65
FIGURA 4.6 – Curvas de comprimento da trinca vs. Número de ciclos dos três corpos de prova ensaiados para R=0,1 e Frequência de 30Hz.	67
FIGURA 4.7 – Equação do comprimento da trinca vs. Número de ciclos para o CP1, para R=0,1 e Frequência de 30Hz.	68
FIGURA 4.8 – Equação do comprimento da trinca vs. Número de ciclos para o CP2, para R=0,1 e Frequência de 30Hz.	68
FIGURA 4.9 – Equação do comprimento da trinca vs. Número de ciclos para o CP3, para R=0,1 e Frequência de 30Hz.	69
FIGURA 4.10 – Taxa de crescimento da trinca em função da variação da intensidade de tensões para R=0,1 e Frequência de 30Hz.	70
FIGURA 4.11 – Curvas da/dN vs ΔK em escala logarítmica do corpo de prova CP1 para R=0,1 e Frequência de 30Hz.	70
FIGURA 4.12 – Curvas da/dN vs ΔK em escala logarítmica do corpo de prova CP2 para R=0,1 e Frequência de 30Hz.	71
FIGURA 4.13 – Curvas da/dN vs ΔK em escala logarítmica do corpo de prova CP3 para R=0,1 e Frequência de 30Hz.	71

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 Detalhamento das falhas de um Britador.....	41
TABELA 3.1 - Características técnicas do instrumento de ultrassom.....	55
TABELA 3.2 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A572.....	59
TABELA 3.3 - Composição química do aço ASTM A572	59
TABELA 4.1 - Resultado dos ensaios de Ultrassom	65
TABELA 4.2 - Coeficientes C e m obtidos para condição de ensaio	72
TABELA 4.3 - Coeficientes C e m para aços estruturais obtidos na literatura.....	72
TABELA 4.4 - Coeficientes C e m para o aço SAE 1045	73
TABELA 4.5 - Comparativo do crescimento da trinca para os ensaios de ultrassom e de laboratório.....	74
TABELA 4.6 - Comparativo do crescimento da trinca para os ensaios de ultrassom e de laboratório ajustado	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas

a_0	Comprimento inicial da trinca [mm]
a_c	Comprimento crítico da trinca [mm]
COD	Deslocamento de abertura da trinca [mm]
da/dN	Taxa de propagação de trinca por fadiga [mm/ciclo]
$f(a/W)$	Fator geométrico [adimensional]
Gr	Grau
K_{IC}	Fator de intensidade de tensão crítico no modo I de fratura no estado plano de deformações [$MPa\sqrt{m}$]
K_C	Fator de intensidade de tensão crítico no estado plano de tensões [$MPa\sqrt{m}$]
K_{max}	Fator de intensidade de tensão máximo [$MPa\sqrt{m}$]
K_{min}	Fator de intensidade de tensão mínimo [$MPa\sqrt{m}$]
K_{th}	Fator de intensidade de tensão limite [$MPa\sqrt{m}$]
ΔK	Variação do fator de intensidade de tensão [$MPa\sqrt{m}$]
σ_{max}	Tensão máxima [MPa]
σ_{min}	Tensão mínima [MPa]
σ_m	Tensão média [MPa]
σ_a	Tensão alternada [MPa]
σ_{xx}	Tensão na direção x [MPa]
σ_{yy}	Tensão na direção y [MPa]
σ_{zz}	Tensão na direção z [MPa]
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Tensões de cisalhamento [MPa]

Siglas

ASTM	American Society for Testing and Materials
COD	Crack Opening Displacement
CT	Compact Tension
END	Ensaio Não Destrutível

LRSS

Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação

MFLE

Linear Elastic Fracture Mechanics

V/S

Versus

NOMENCLATURAS

Letras Latinas

a	Comprimento da trinca [mm]
B	Espessura do corpo de prova [mm]
C	Constante da lei de Paris [adimensional]
E	Módulo de elasticidade [GPa]
K	Fator de intensidade de tensões [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
m	Constante da lei de Paris [adimensional]
N	Número de ciclos [ciclos]
P	Carga [N]
R	Razão de carga [adimensional]
w	Largura do corpo de prova [mm]

Letras Gregas

α	Relação (a/W)
γ	Energia elástica de superfície do material
θ	Coefficiente de encruamento
σ	Tensão [MPa]
ν	Abertura do extensômetro (COD) [mm]

RESUMO

Como as recuperadoras de minério são extremamente solicitadas no processo de mineração, a sua manutenção tem custo elevado. Um modo de falha frequente, de acordo com os dados da manutenção, é a ocorrência de trincas que podem levar à fratura. Este problema vem sendo resolvido pela manutenção, através da soldagem das partes danificadas. A causa raiz da falha, no entanto, não vem sendo atacada, o que ocasiona pouca efetividade na resolução do problema. O objetivo deste trabalho é estudar a velocidade de propagação de trincas em fadiga do aço ASTM A572, material comumente utilizado para fabricação de caçambas de recuperadoras de minério. Para desenvolvimento do estudo, foi realizado ensaio não destrutivo (ultrassom) para identificação e determinação do valor de crescimento de uma trinca, após N ciclos de trabalho conhecido, de uma caçamba em serviço. Em segundo momento, foram realizados ensaios de fadiga em laboratório. Os corpos de prova ensaiados foram fabricados com material extraído da própria caçamba em serviço. A partir dos dados e resultados dos ensaios de laboratório, foi possível determinar as equações e gráficos correspondentes a variação do tamanho da trinca (Δa) em função de número de ciclos (N) e velocidade de propagação da trinca (da/dN) versus variação do fator de concentração de tensões (ΔK). Os resultados obtidos nos ensaios de campo da caçamba em serviço foram comparados com o resultados do corpo de prova em laboratório e a diferença entre eles é perfeitamente aceitável e justificável. Devido à boa aproximação dos resultados, os parâmetros característicos de fadiga (C) e (m) obtidos para o material em questão podem ser utilizados para previsões de vida de um componente e estabelecer dados confiáveis que podem suportar o planejamento da manutenção e planejamento de suprimentos de materiais e serviços.

Palavras Chave: Fadiga, propagação de trincas, curvas da/dN , recuperadoras de minério, caçamba.

ABSTRACT

As reclaimers are extremely used in the mining process, their maintenance costs are high. A frequent failure mode, according to maintenance data, is the occurrence of cracks that can lead to fracture. This problem has been solved by maintenance by welding the damaged parts. The root cause of the failure, however, has not been attacked, which has caused little effectiveness in solving the problem. The objective of this work is to study the fatigue crack propagation velocity of ASTM A572 steel, a material commonly used to manufacture buckets of reclaimers. For the development of the study, a non-destructible test (ultrasound) was performed to identify and determine the growth value of a crack, after N cycles of known work, of a bucket in operation. At second moment, fatigue tests were performed in the laboratory. The test specimens were made of material extracted from the bucket in service. From the data and results of the laboratory tests it was possible to determine the equations and graphs correspondent to the crack size (a) versus number of cycles (N) and crack propagation velocity (da / dN) versus factor stress concentration (ΔK). The results obtained in the in-service bucket tests were compared with the laboratory test results and the difference between them is perfectly acceptable and justifiable. Due to the good approximation of the results, the characteristic fatigue parameters (C) and (m) obtained for the studied material can be used for life predictions of parts and components of machines and establish reliable data that can support planning of the maintenance and planning of supplies of materials and services.

Keywords: Fatigue, crack propagation velocity, curves da/dN , reclaimers, bucket.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

O grande avanço dos países emergentes, em especial a China, no início dos anos 2000, promoveu uma crescente demanda pelas commodities, dentre elas a vasta gama de produtos minerais tais como o cobre, níquel, carvão e minério de ferro, além dos produtos minerais para indústria de fertilizantes.

Todos esses produtos são obtidos em seu estado final para produção de materiais e outros produtos somente após uma extensa cadeia produtiva. Tal cadeia produtiva é compreendida por diversas especialidades da indústria em vários segmentos e disciplinas.

A indústria da mineração, responsável pelo grande volume de produção de commodities em todo o mundo, exige a utilização de muitas máquinas e equipamentos robustos capazes de explorar, processar e transportar os diversos “minérios” devidamente tratados e adequados para o consumo de outras indústrias e servir de matéria prima de outros produtos.

Em meados da segunda década dos anos 2000, a mesma indústria da mineração se deparou com o forte efeito da crise mundial e, conseqüentemente, queda do preço das commodities. De maneira geral, os produtores dos diversos minérios se viram na obrigação de reduzir os custos de produção em especial as despesas operacionais.

Até então, na história da mineração, a engenharia nunca fora tão exigida com o intuito de promover otimização de processos e busca por melhoria contínua.

A criação e desenvolvimento de recursos técnicos em máquinas e equipamentos com o intuito de promover aumento de capacidade, aumento de durabilidade e resistência dos materiais, maior vida útil e aumento de confiabilidade tem sido o desafio constante dos engenheiros e líderes que precisam alavancar resultados rápidos a fim de manter competitividade de suas empresas.

Atrelado ao aumento de confiabilidade, faz-se necessário o estudo e análise dos diversos modos de falha dos equipamentos da mineração.

Diante do exposto, a justificativa para o desenvolvimento do presente trabalho foi exatamente a necessidade de explorar, de maneira científica, um dos principais modos de falha em máquinas e equipamentos da mineração que são as falhas sob fadiga e fratura de componentes. Em especial conhecer os fatores que influenciam a velocidade de propagação de trincas e relacionar os conceitos com o comportamento real de caçambas de recuperadoras de minério em serviço.

Por se tratar de um tema estritamente técnico da engenharia mecânica e de materiais, fortemente relacionado com a manutenção industrial, o trabalho permitirá o desenvolvimento, de maneira científica, de um estudo capaz de gerar soluções e ganhos práticos para aplicação na indústria da mineração.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia que use fundamentos da mecânica de fratura linear elástica para analisar o comportamento estrutural e mecânico das caçambas de uma recuperadora de minério em serviço sob fadiga.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Determinação da velocidade de propagação de trinca por fadiga em caçambas de recuperadoras de minério através de um estudo baseado no comportamento real de serviço da máquina. Tal estudo utilizará a técnica de Ensaios Não Destrutivos (END) e simulação por elementos finitos para determinação dos pontos de maiores tensões atuantes e consequentemente identificar uma trinca e determinar seu comprimento inicial (a_0).
- Utilizar amostras do material de uma caçamba em serviço para fabricação de corpos de prova e realizar ensaios de fadiga em laboratório com o intuito de obter os parâmetros necessários para os cálculos da velocidade de propagação de trincas e vida em fadiga do material.
- Efetuar a análise comparativa dos resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Principais equipamentos da indústria da mineração

A indústria da mineração é composta por uma extensa cadeia produtiva compreendida de vários equipamentos responsáveis por permitirem a exploração mineral, processamento e beneficiamento, transporte interno e logística ao cliente final.

Na exploração mineral, os principais equipamentos são as perfuratrizes, escavadeiras, pás carregadeiras, caminhões fora de estrada (Giant Trucks), etc.

Para processamento, beneficiamento e transporte interno, os principais equipamentos são os britadores, moinhos, peneiras vibratórias, alimentadores, transportadores de correia, empilhadeiras de minério, recuperadoras de minério, dentre outros.

Os caminhões rodoviários, composições de trens e vias férreas permanentes, viradores de vagão, carregadores de navio e os navios cargueiros são os principais equipamentos usados na logística e escoamento do produto final.

No processo de beneficiamento e transporte interno está concentrado o maior número de equipamentos em diversos modelos e características. Os equipamentos do processo de beneficiamento podem trabalhar de forma agrupada e coordenada em prédios industriais formando as denominadas Usinas de Beneficiamento. Em outros casos, pode haver o arranjo com uma gama de equipamentos com relativa dispersão geográfica interligados pelos transportadores de correia.

Em função do objetivo deste trabalho, a revisão bibliográfica será focada apenas nas recuperadoras de minério.

2.1.1 Recuperadoras de minério

As recuperadoras de minério são máquinas que têm a função de transferir o minério estocado em pátios para plantas de reprocessamento ou expedição via composição de trens.

As recuperadoras ou retomadoras (reclaimers) são compostas por três sistemas principais: translação, rotação e roda de caçambas.

O sistema de translação possui um sistema de trucks que permite a locomoção ao longo de trilhos instalados na extensão do pátio de estocagem.

O sistema de rotação (giro) permite que a máquina recupere o minério em pilhas formadas nos dois lados do pátio de estocagem, aumentando sua versatilidade.

A roda de caçambas é o componente de ataque principal ao material a ser recuperado / retomado. A roda de caçambas pode ser acionada por sistema mecânico convencional ou sistema hidráulico (Unidades hidráulicas + motor hidráulico). A quantidade de caçambas varia de acordo com a geometria e taxa de trabalho a qual a máquina foi projetada para trabalhar.

As caçambas são fixadas na estrutura da roda através de parafusos e são protegidas interna e externamente por material resistente à abrasão.

De uma maneira geral, as recuperadoras de minério são máquinas de grande porte, conforme pode ser visto nas FIGs. 2.1 (a) e (b), e seus sistemas precisam ser coordenados para alcançar a máxima performance e produtividade.

A melhor combinação entre os aspectos de controle que são a velocidade angular e avanço do lance de ataque da roda de caçambas mais o balanceamento geral do conjunto e estrutura do lance, permitem que a máquina seja utilizada de maneira produtiva, segura e confiável.



(a)



(b)

FIGURA 2.1 – Recuperadora de minério, visão geral.

FONTE – VALE – Manual de proceso mineral, 2011.

Como as recuperadoras de minério são máquinas extremamente solicitadas, seu projeto deve contemplar um bom dimensionamento estrutural e de seus elementos de máquinas. Dentre os itens de maior criticidade está a caçamba, que é muito requerida, haja vista que é o componente que terá o contato direto com o minério, que por sua vez, pode apresentar diferentes características adversas ao desempenho das máquinas.

Para o trabalho com materiais de alta granulometria faz-se necessário o revestimento das caçambas com materiais de alta resistência à abrasão.

Em situações mais severas de trabalho, em que o material a ser processado apresente alto grau de compactação, a caçamba atua como uma espécie de escavadeira. Essa condição de trabalho provoca considerável magnitude de tensões triaxiais em pontos específicos das caçambas e exige alta resistência mecânica e desempenho dos sistemas de acionamento convencionais ou hidráulicos.

A FIG. 2.2 apresenta dois modelos básicos de caçambas de recuperadoras de minério. Apesar da grande robustez, as caçambas exigem critérios de projetos que extrapolam os cálculos estruturais. Definição da melhor geometria e seleção do material adequado são essenciais para mitigar a incidência de falhas.

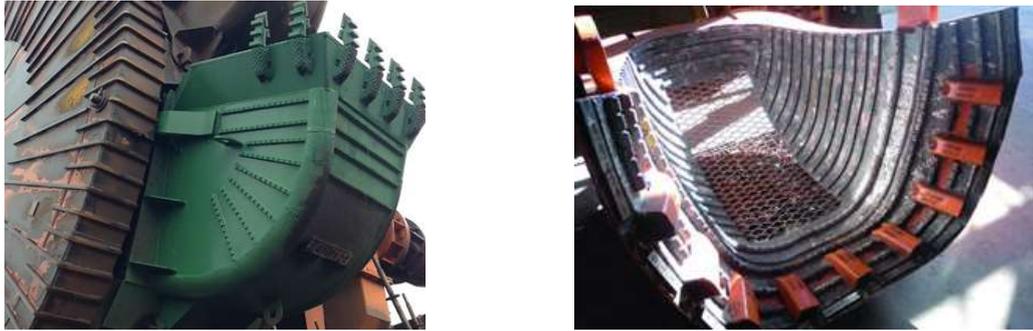


FIGURA 2.2 – Caçamba de recuperadora de minério.

FONTE – RAILROAD – Catálogo de aplicações, 2014.

2.2 Falhas em componentes mecânicos

As falhas de componentes mecânicos e estruturas constituem um sério problema para a indústria e para a sociedade. Em muitos casos, os prejuízos financeiros são muito superiores ao custo unitário do componente fraturado e, em outros, podem resultar em acidentes capazes de colocar vidas humanas em risco. Dentre os fatores que causam fratura pode-se listar: a seleção imprópria de materiais, a presença de defeitos de fabricação, erros de projeto ou de montagem, negligência na manutenção e o uso indevido.

A análise de componentes estruturais sofreu um desenvolvimento bastante acentuado nas últimas décadas, com o surgimento de estudos detalhados nos campos de fadiga, mecânica da fratura, confiabilidade estrutural e método numérico de análise estrutural (DA ROSA, 2002).

2.2.1 Falhas – definições e generalidades

Falha é um termo geral utilizado para indicar que um componente ou peça em serviço se tornou completamente inoperante, continua operante mas se tornou incapaz de desempenhar satisfatoriamente a sua função ou se está seriamente comprometido a ponto de se tornar inseguro para o uso contínuo (ASM Handbook – Ninth edition, Metals Handbook, volume 11 – Failure analysis and prevention).

A falha pode ser classificada como falha funcional ou falha física conforme ilustrado na FIG. 2.3:

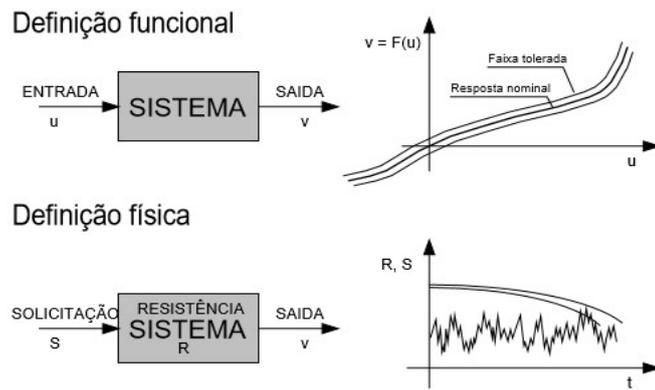


FIGURA 2.3 – Representação esquemática da definição de um sistema e a representação da falha.

FONTE – DA ROSA, 2002.

A funcionalidade do sistema é representada pela entrada - saída, na forma $v = F(u)$. A falha física depende dos valores no tempo de S e R.

De acordo com a definição funcional de falha, quando a resposta cai fora da faixa tolerada, o sistema já deixa de cumprir sua função e logo falha. A causa desta falha pode ser realmente um colapso, na forma de uma ruptura, ou pode ser um desgaste excessivo, ou uma falta de rigidez, ou qualquer outra causa. Para uma melhor compreensão do que ocorre com o sistema na condição de falha é necessário introduzir o conceito de modo de falha, ou seja, a definição física de falha.

Da Rosa (2002) menciona que a falha funcional ocorre porque a capacidade do sistema de suportar uma dada demanda foi excedida, o que em problemas estruturais pode ser colocado na forma de que a resistência do sistema, R, não é suficiente para suportar a solicitação, S. Assim, a falha é definida pelo evento $S > R$. A solicitação está diretamente ligada à entrada u, muitas vezes $S = u$. Já a resistência é uma característica intrínseca do sistema, dependendo de como este é construído, dimensões, materiais, etc.

As falhas podem ser classificadas ainda como independentes do tempo e dependentes do tempo.

As falhas independentes do tempo são aquelas que possuem a mesma probabilidade de ocorrência, qualquer que seja a vida ou tempo de uso do produto considerado. Essas falhas se manifestam quando a estrutura em questão sofre uma sobrecarga ou um pico de solicitação. Um exemplo deste modo de falha é a Fratura.

As falhas dependentes do tempo são aquelas que variam em função do número de horas de trabalho do equipamento ou componente. Os principais modos de falha são: Desgaste, corrosão, fluência e fadiga.

2.3 Falhas por fadiga

Os avanços nos estudos relacionados à análise de falhas têm mostrado que, dentre as causas distintas de falha de componentes mecânicos, a mais comum é falha por fadiga do material. Sendo que, na maioria das vezes, são falhas que ocorrem de forma inesperada, repentinamente, portanto bastante perigosas.

Zolin (2011) define a fadiga como uma redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. Este crescimento ocorre para cada flutuação do estado de tensões. As cargas variáveis, sejam cíclicas ou não, fazem com que, ao menos em alguns pontos, tenha-se deformações plásticas também variáveis com o tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à trinca, a qual cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil.

Norton (2006) complementa em sua definição de fadiga que falhas ocorrem, tipicamente, em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais. Assim, quando estão envolvidos carregamentos dinâmicos, as teorias de falhas para carregamentos estáticos podem levar a projetos sem segurança.

O processo de fadiga ocorre em três estágios: Nucleação da trinca, propagação da trinca e fratura. A FIG. 2.4 representa, através das letras A, B e C as regiões de ocorrência de cada estágio.

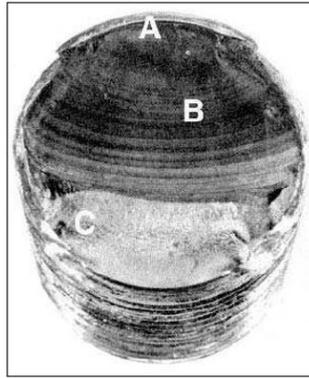


FIGURA 2.4 – Estágios do processo de fadiga. a) nucleação da trinca, b) propagação da trinca, c) ruptura catastrófica.

FONTE –NORTON, 2006.

Antes de aprofundar no estudo do fenômeno da fadiga, faz-se necessário o entendimento de alguns conceitos relativos às tensões atuantes e flutuantes no material e que são usadas nos ensaios de fadiga

A FIG. 2.5 expõe um resumo gráfico e da relação de equações que definem: Tensão alternada (σ_a); tensão mínima (σ_{\min}); tensão máxima (σ_{\max}); relação de tensões (R).

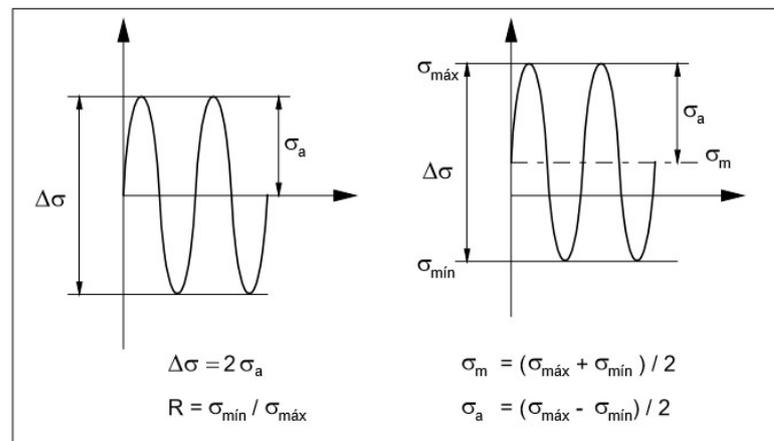


FIGURA 2.5 – Tensões atuantes: Definições.

FONTE –DA ROSA, 2002.

Da Rosa (2002) ressalta que tendo em vista a abrangência, complexidade e solicitação dos sistemas e equipamentos mecânicos, os critérios de fadiga devem ser aplicados criteriosamente nos dimensionamentos e projetos. A vasta gama de variáveis com uso de diferentes materiais, ciclos de carga, exigência de segurança, etc faz com que o critério de projeto e análise da resistência à fadiga tenha que ser também diferente para cada caso considerado.

Embora os critérios para projeto de fadiga tenham sido substancialmente alterados com o desenvolvimento da técnica e do conhecimento mais aprofundado do problema, muitos destes critérios são ainda válidos. As condições de uso de diferentes componentes mecânicos são muito variados e existem situações onde os critérios, mesmo os mais antigos, são ainda aplicáveis. Os principais critérios de projeto, estão descritos abaixo:

Projeto para vida infinita - Os primeiros projetos mecânicos, levando em conta a fadiga, eram baseados em uma segurança quanto à falha quase ilimitada, com os componentes dimensionados para uma vida infinita. Esse critério exige que as tensões atuantes estejam suficientemente abaixo da tensão limite de fadiga pertinente. Muitas peças que operam com um carregamento cíclico aproximadamente constante durante vários milhões de ciclos, devem ser dimensionadas para vida infinita. Este é o enfoque mais clássico da análise de fadiga, usando os conceitos da curva de Wohler e da tensão limite de fadiga. Como exemplos podem ser citados os eixos de motores, molas de válvulas de um motor de combustão, engrenagens industriais.

Projeto para vida finita – Situações em que as condições de carregamento são sensivelmente imprevisíveis ou inconstantes torna-se inviável projetar um componente para a carga máxima esperada pois ter-se-ia dimensões, peso e custo exorbitantes, além do que a carga máxima poderia ocorrer poucas vezes ao longo da vida útil do equipamento. Os principais exemplos são os mancais de rolamento, vasos de pressão, motores a jato etc.

Desta forma, justifica-se a determinação de uma vida finita para os componentes submetidos a essa solicitação.

O dimensionamento ou análise pode ser feito com base nas relações tensão-vida (S-N), deformação-vida (ϵ -N), ou ainda de propagação de trincas pré-existentes (a - ΔK).

Projeto com tolerância ao dano – Parte-se do princípio que a estrutura já possui uma fissura, oriunda da fabricação ou operação. Com a aplicação dos conceitos da mecânica da fratura, os projetos são desenvolvidos de modo que as trincas pré-existentes não cresçam a um tamanho tal que leve à falha antes que sejam detectadas pelas inspeções preventivas ou preditivas.

Fuselagens e asas de aviões, reservatórios, tubulação e oleodutos são alguns dos exemplos.

Baseado em cada um dos critérios de projetos mencionados, pode-se utilizar cada uma ou combinação das metodologias básicas para análise de fadiga:

- tensão-vida (S-N),
- deformação-vida (ϵ -N),
- propagação de trincas pré-existentes (a - ΔK)

2.3.1 Método S-N – Fadiga controlada por tensão

O método da tensão nominal (curva S-N) foi o primeiro a ser desenvolvido para entender o fenômeno da variação da vida de um componente com a tensão alternada a que ele está submetido.

Com um estudo do gráfico, é possível observar que quanto maior a magnitude da tensão, menor será o número de ciclos antes de ocorrer a falha no material. Para algumas ligas ferrosas e de titânio, a curva S-N, FIG. 2.6 (a) se torna horizontal para valores de N mais elevados; ou seja existe um nível de tensão limitante, chamado de limite de resistência à fadiga, abaixo do qual a falha por fadiga não irá ocorrer. Para a maioria das ligas não ferrosas, é aplicado algo que é chamado de resistência a fadiga, pois os mesmos não possuem um limite de resistência à fadiga no sentido de que a curva σ -N continua a sua tendência decrescente para maiores valores de N conforme mostrado na FIG. 2.6 (b).

De acordo com Norton (2006), alguns fatores que afetam as curvas S-N são: acabamento superficial, tamanho da estrutura, tipo de carregamento, confiabilidade requerida pelo projeto.

O método da tensão nominal apresenta algumas limitações quanto à confiabilidade de sua aplicação. Machado (2002) afirma que as curvas S-N não são apropriadas para descrever o estado físico da estrutura para um dado tempo e nem mesmo determinar com boa aproximação a resistência ou limite de fadiga em determinados pontos de um componente. Para tal, são necessários outros métodos de análise de fadiga.

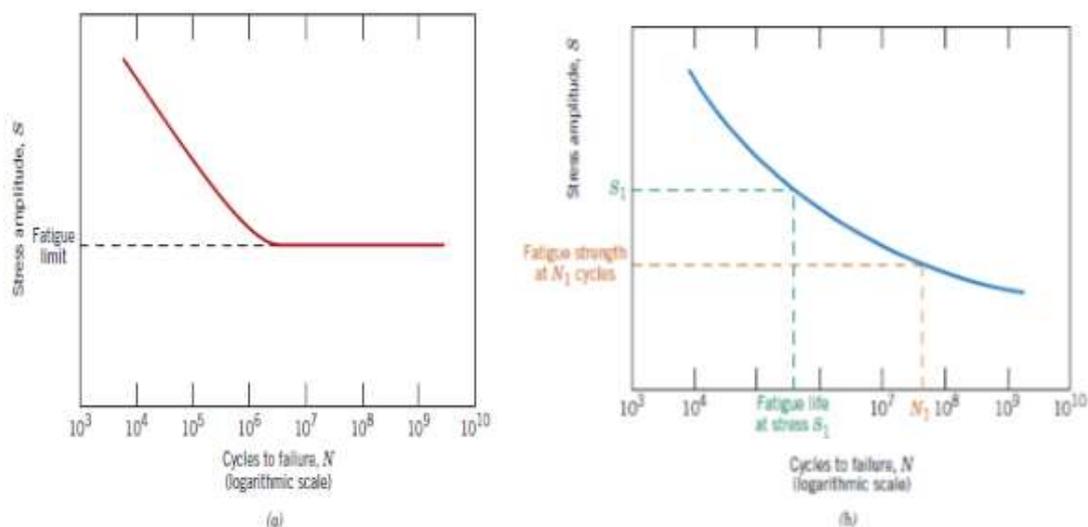


FIGURA 2.6 – Curvas S-N para (a) um material que exibe um limite de resistência a fadiga (b) um material que não exibe um limite de resistência a fadiga.

FONTE –CALLISTER, 2007.

2.3.2 Método ϵN – Fadiga controlada por deformação

Esta metodologia é definida por Lee (2005) como um método baseado na assumption de que a vida decorrida na nucleação e pequeno crescimento da trinca em um entalhe pode ser aproximado por uma amostra de laboratório sob a mesma deformação cíclica no local de iniciação da trinca. Utilizando este conceito, é possível determinar a vida em fadiga em um determinado ponto do componente ciclicamente carregado se a relação entre local da deformação da amostra e vida em fadiga forem conhecidos.

Para Da Rosa (2002), o comportamento macroscópico do material, na fadiga, pode ser entendido com a resposta de tal material às tensões e deformações provocadas pelo carregamento cíclico.

Tratando-se das tensões, no caso de um corpo sendo testado com controle de carga e assumindo que a área da seção transversal permaneça constante, a tensão cíclica varia entre os limites de σ_{\min} e σ_{\max} , diretamente relacionados com os valores de F_{\min} e F_{\max} . Já a deformação do material é livre, controlada apenas pela sua resposta mecânica às tensões cíclicas aplicadas. A FIG. 2.7 representa o comportamento macroscópico em um ensaio com controle de força e deslocamento.

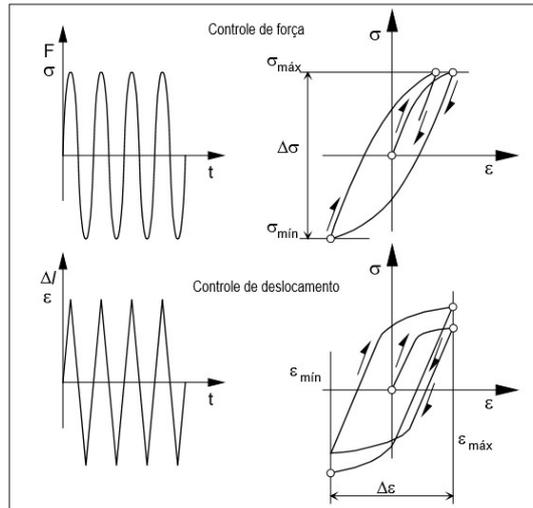


FIGURA 2.7 – Comportamento macroscópico de um corpo solicitado por uma carga cíclica. Ensaio com controle de força e deslocamento.

FONTE – DA ROSA, 2002.

Uma relação entre a amplitude de deformações $\Delta\epsilon$ e a vida à fadiga N , como a regra de Coffin-Manson pode ser aplicada pela expressão:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N)^b + \epsilon'_f(2N)^c \quad (2.1)$$

Onde (σ'_f) é o coeficiente de resistência à fadiga, (b) é o expoente de resistência à fadiga, (ϵ'_f) é o coeficiente de ductilidade à fadiga e (c) é o expoente de ductilidade à fadiga.

2.3.3 Acúmulo de dano – Carregamentos aleatórios

A maioria dos equipamentos e componentes durante o serviço em ambientes reais de uso estão submetido a carregamentos aleatórios. De acordo com a regra de acúmulo de danos, o dano que a peça sofreu sob a ação de uma dada amplitude da tensão cíclica é diretamente proporcional ao número de ciclos em que atuou aquela amplitude de tensão. Sendo n_i o número de ciclos atuantes, para uma amplitude de tensão σ_i , o dano provocado por esta sollicitação cíclica será, segundo a regra de Miner (DA ROSA, 2012):

$$D_i = n_i/N_i \quad (2.2)$$

onde N_i é a vida que o material teria quando submetido ao carregamento de amplitude σ_i , atuando isoladamente. Para vários níveis de tensão o dano total pela regra linear de acúmulo de dano, é dado por

$$D = \sum_i D_i \quad (2.3)$$

O critério de falha por fadiga, em uma situação com acúmulo de dano, indica um dano máximo de $D = 1$, o que é intuitivo para o caso de um carregamento com um só nível, onde a falha ocorre logicamente quando $n_i = N_i$.

A FIG. 2.8 mostra uma curva S-N hipotética e um gráfico de um carregamento, também hipotético, para o número de ciclos atuantes em dois níveis de tensão distintos. Conhecendo-se a equação da curva S-N pode-se determinar o dano pela equação 2.3.

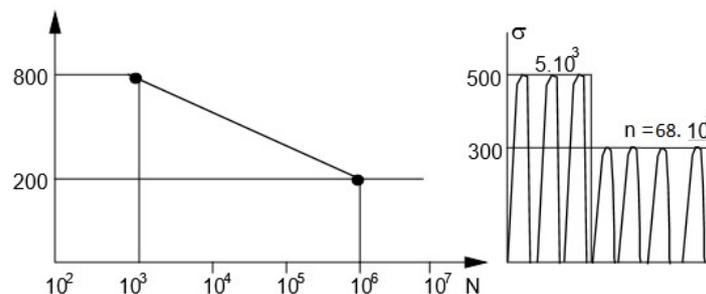


FIGURA 2.8 – Curva S-N do material e carregamento aplicado.

FONTE – DA ROSA, 2002.

Da Rosa (2002) menciona ainda que existem algumas limitações quanto ao uso da regra de Miner principalmente pela presença de tensões residuais que ficam nos pontos críticos. Apesar das limitações, a regra de Miner é muito usada como uma orientação preliminar, pois no momento não existe uma alternativa prática tão simples e versátil quanto à regra linear de acúmulo de dano. As outras teorias desenvolvidas são mais trabalhosas de usar, às vezes de aplicação limitada, e não existem dados experimentais seguros que indiquem que uma teoria seja melhor do que a outra. Assim, é recomendada a de Miner, porém tendo-se em mente as limitações da regra e as dispersões inerentes do processo de fadiga. Uma recomendação para projeto é adotar $\sum n_i/N_i=0,3$, para os casos onde não existe experiência anterior, como sendo o valor limite que indica a falha iminente do material (DA ROSA, 2002).

2.3.4 Método Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE) – Propagação de trincas pré existentes

De acordo com a literatura especializada, o número crescente de falhas catastróficas em estruturas solicitadas por níveis de tensões abaixo dos valores admissíveis levou ao desenvolvimento dos princípios da mecânica da fratura. Os conceitos da mecânica da fratura permitem a quantificação dos níveis admissíveis em que um componente com trincas pode operar, sem que venha a falhar.

O modo de falha habitual nestes casos era a propagação instável de uma trinca, sem que tivessem ocorrido deformações plásticas apreciáveis. Assim, a energia que era absorvida no processo de fratura era pequena. O principal ponto de estudo da Mecânica da Fratura é o comportamento do material quando contém uma trinca. O processo de ruptura do material ocorre pelo crescimento de uma trinca que pode ser devido a um defeito inerente ao material, decorrente do processo de fabricação, como trincas de tratamento térmico, defeitos de soldagem, falhas internas em componentes fundidos, etc. Em outros casos, a trinca pode-se desenvolver devido a uma solicitação dinâmica, como na nucleação de trincas de fadiga (DA ROSA, 2002).

Para Lee (2005), um entendimento fundamental da mecânica da fratura e o limite no uso de seus parâmetros são necessários para as aplicações apropriadas ao modelo de propagação de trincas por fadiga.

Uma trinca, para se propagar, exige que a tensão no seu extremo ultrapasse a tensão coesiva do material, que é a tensão que mantém os átomos unidos. Um critério para materiais frágeis, denominado de critério de Griffith, baseado em um balanço de energias, prevê a força que deve ser aplicada em um corpo para propagar a trinca, é mais adequado para iniciar o estudo da fratura (DA ROSA, 2002).

De acordo com Bannantine (1990), Griffith formulou o conceito que uma trinca irá propagar-se quando a energia total do sistema for menor que a variação da energia de deformação resultante de um crescimento incremental da trinca.

Bannantine (1990) considera que a mecânica da fratura linear elástica (MFLE) é baseada na aplicação da teoria da elasticidade dos corpos contendo trincas ou defeitos. A forma geral da MFLE é dada pela equação 2.4:

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.4)$$

Onde r e θ são coordenadas cilíndricas do ponto com respectiva trinca típica e K é o fator de intensidade de tensão, FIG. 2.9.

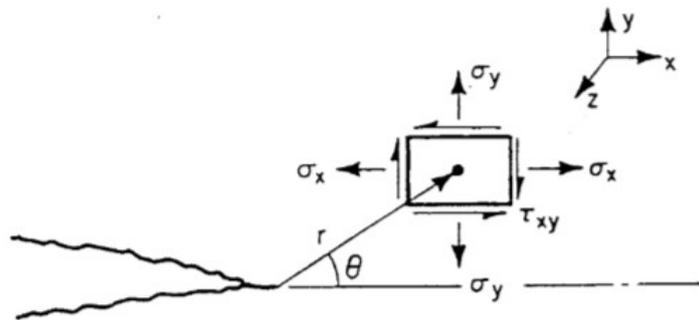


FIGURA 2.9 – Ponto da tensão local próximo a uma trinca típica em coordenadas cilíndricas.
FONTE – BANNATINE, 1990

Por causa das diferentes condições de carregamento, a frente da trinca pode ser submetida a três modos primários de carregamento. Um sistema de coordenadas cartesianas é atribuído de tal forma que a frente de trinca está na direção z . Conforme mostrado na FIG. 2.10, a trinca está sujeita ao Modo I, o modo de abertura ou de tração, onde as tensões e deformações no plano são simétricas em relação ao eixo x . Para a trinca sujeita ao Modo II, o modo de corte deslizante ou no plano, as tensões e as deformações são anti-simétricas em relação ao eixo x . No caso do Modo III, o modo de corte rasgado ou anti-plano, as tensões e deformações fora do plano são anti-simétricas em relação ao eixo x (LEE, 2005).

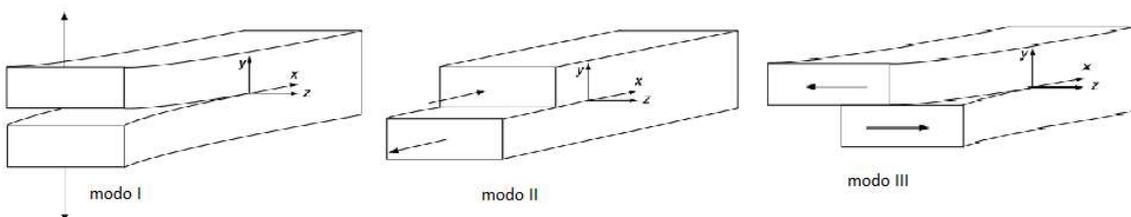


FIGURA 2.10 – Modos de carregamento de uma trinca.
FONTE – LEE, 2005.

A literatura afirma que a energia aproximada é equivalente ao fator de intensidade de tensão aproximado e que a propagação da trinca ocorre quando a taxa de energia de deformação (ou em termos do fator de intensidade de tensão crítico, K_C) é alcançada.

- Fator de intensidade de tensão

O fator de intensidade de tensão K define a magnitude da tensão local em torno da ponta da trinca. Esse fator depende do modo de carregamento, do tamanho da trinca, da forma da trinca e fator geométrico para cada tipo de carregamento. É dado por:

$$K = f(g)\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

Onde:

σ = tensão aplicada no componente

a = comprimento da trinca

$f(g)$ = fator de correção que depende do corpo de prova e geométrica da trinca.

$$g = \frac{a}{w} \quad (2.6)$$

Onde:

w = largura do corpo de prova

O término da vida útil de uma estrutura, por sua ruptura brusca, fica definido pelo fator de intensidade de tensão crítico, K_{IC} ou K_C , conforme esteja em um estado plano de deformações ou não.

2.3.4.1 Propagação da trinca por fadiga

Na grande maioria dos casos, o material não pode ser considerado homogêneo, pois sempre existem defeitos oriundos do processo de fabricação. Da Rosa (2002) menciona que nestes casos, a vida de fadiga depende só da resistência à propagação dos defeitos do material, já que a nucleação da trinca é imediata, a partir do defeito. A previsão da resistência mecânica deve, nestes casos, levar em conta explicitamente a propagação da trinca. A partir desses conceitos,

a vida é calculada unicamente pela propagação do defeito desde seu tamanho inicial até o correspondente tamanho crítico, que depende do material, do carregamento e da geometria. A previsão de vida depende diretamente da velocidade de propagação da trinca, da/dN , ou \dot{a} , a qual é função da sollicitação cíclica no extremo da trinca, caracterizada por ΔK (amplitude do fator de intensidade de tensões).

$$\Delta K = k_{max} - k_{min} = f(g)\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.7)$$

Experimentalmente, foi observado por Paris e Erdogan (1963) que o crescimento da trinca por ciclo de carregamento era função de ΔK atuando na ponta da trinca. A partir daí, utilizou-se a variação do fator de intensidade de tensões (ΔK) para descrever a propagação das trincas de fadiga. A taxa de propagação de trinca de fadiga pode ser definida como a razão da extensão da trinca, Δa , pelo número de ciclos, ΔN , ou seja, $\Delta a/\Delta N$, quando $\Delta N \rightarrow 0$:

$$\lim_{\Delta N \rightarrow 0} \frac{\Delta a}{\Delta N} = \frac{da}{dN} \quad (2.8)$$

A FIG. 2.11 apresenta um gráfico capaz de deixar evidente a relação entre o comprimento da trinca (a) com o número de ciclos (N) durante o carregamento cíclico.

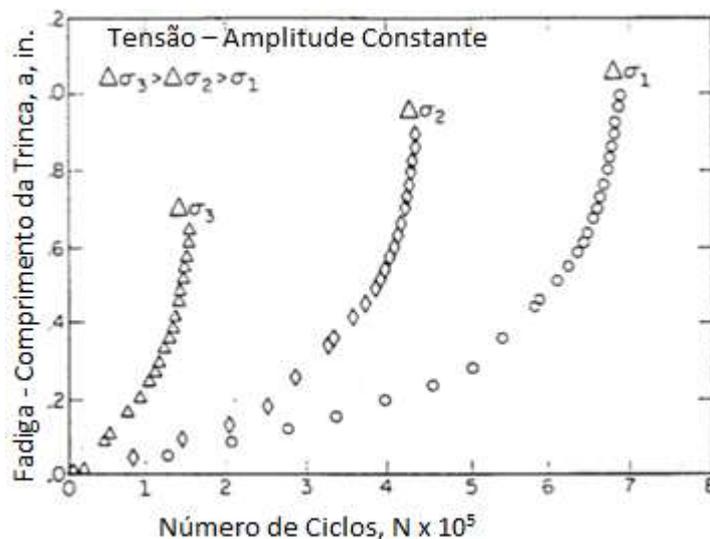


FIGURA 2.11 – Crescimento de uma trinca de fadiga considerando 3 diferentes níveis de amplitudes de tensão.

FONTE – BANNANTINE, 1990.

Os dados de propagação da trinca são obtidos monitorando o seu tamanho, durante o ensaio, obtendo-se a curva de seu crescimento. A trinca, no início, cresce lentamente, porém conforme aumenta de tamanho a velocidade de crescimento sobe rapidamente, levando à ruptura final. A velocidade de propagação, ou seja, da/dN , ou simplesmente \dot{a} , quando colocada em um gráfico em termos do fator de intensidade de tensão, ΔK , resulta em uma curva tipicamente da forma mostrada na FIG. 2.12 (DA ROSA, 2002).

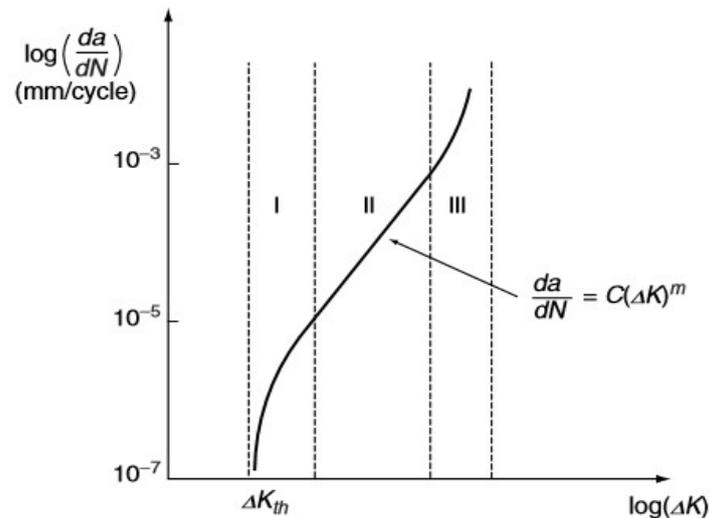


FIGURA 2.12 – Taxa de crescimento de uma trinca da/dN esquematicamente plotada como função da amplitude do fator de intensidade de tensões ΔK em uma escala log-log.

FONTE – LEE, 2005.

O gráfico da/dN vs ΔK apresenta três regiões bem distintas, onde os fenômenos envolvidos são diferentes.

- Região I:

Nesta região, a velocidade de propagação é muito baixa, da ordem de 10^{-9} m/ciclo, o que corresponde a um crescimento por ciclo da mesma ordem de grandeza do espaçamento atômico na rede cristalina. De acordo com Da Rosa (2002), nesta região o crescimento da fissura é extremamente sensível à microestrutura do material. Uma peculiaridade nesta região é a existência de um nível mínimo para ΔK , denominado de ΔK_{th} (threshold) que é o limiar da faixa do fator de intensidade de tensão abaixo da qual não deve ocorrer crescimento de fissuras de fadiga.

- Região II:

Nesta região, a taxa de crescimento da trinca da/dN pode ser aproximadamente relacionada linearmente com a amplitude do fator de intensidade de tensões ΔK na escala log-log. A relação, conhecida como a lei de Paris para propagação da trinca (Paris et al. 1961; Paris and Erdogan, 1963) é expressa por:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.9)$$

Onde:

C e m são constantes típicas do material.

Da Rosa (2002) lista algumas propriedades do material que influenciam o valor da constante C : Módulo de elasticidade (E), Tensão limite de escoamento ($\sigma_{0,2}$), Tensão de fratura (σ_f), Deformação de fratura (ε_f) e Tenacidade à fratura (K_{IC}).

- Região III:

Nesta região, acontece a propagação instável da trinca, que é quando ΔK é elevado e a taxa de propagação da trinca acelera significativamente. Isto acontece quando K_{max} aproxima de K_c , o qual representa o K crítico para iniciação da fratura de uma dada espessura (LEE, 2002).

Da Rosa (2002) relaciona os modos estáticos responsáveis pela fratura na região III: Microclivagem, separação intergranular e coalescimento de vazios. A microclivagem surge quando o material estiver abaixo da temperatura de transição dútil-frágil, provocando um grande aumento na velocidade de propagação. Nesta situação, a espessura do material influi também de forma sensível, pois em chapas espessas a ruptura por microclivagem é percentualmente maior, como consequência da maior restrição quanto ao desenvolvimento de deformações transversais (tendência para um estado plano de deformação). Se o mecanismo de ruptura é exclusivamente por formação de estrias, a espessura passa a ter um efeito muito pequeno na taxa de propagação.

Meggiolaro e Castro (2001) sintetizam que a fase I é sempre muito mais importante do que a III para os problemas de fadiga, e frequentemente muito mais relevante, do ponto de vista do cálculo da vida, do que a própria fase II. A literatura especializada justifica através do conceito de que uma grande fração da vida de propagação é dispendida quando a trinca é pequena, com baixas velocidades de propagação. Com o aumento do tamanho da trinca, a velocidade passa a ser sensivelmente maior, fazendo com que a vida de propagação restante seja curta. Isto indica que, para garantir uma vida de propagação suficiente, deve-se atentar para os aspectos relacionados com trincas pequenas. Os aspectos relacionados com trinca próximas ao tamanho crítico, como por exemplo, a tenacidade do material, pouco afetam na vida do componente.

2.3.4.2 Principais Fatores que influenciam a propagação da trinca de fadiga

Os estudos na região intermediária de crescimento de trinca apontam uma pequena influência da microestrutura, da tensão média e da espessura.

- Influência da tensão média:

De acordo com um trabalho desenvolvido por Ritchie e Knott (1974) em que o foco foi estudar a região II, o efeito típico de K_{\max} na propagação de trinca por fadiga quando o mecanismo atuante é o de estriações fica evidenciada a pouca influência da tensão média na taxa de propagação. O efeito mais pronunciado seria para baixos valores de ΔK , situação em que aproxima-se do valor limite de propagação de trinca (ΔK_{th}). Considerando mecanismos estáticos, passa a haver uma grande influência na taxa de propagação. Este fato é explicado devido a forte dependência que este micromecanismo apresenta com o K_{\max} à ponta da trinca. A FIG. 2.13 mostra algumas curvas da influência de K_{\max} na taxa de propagação de trincas.

Observações realizadas na região III do gráfico da FIG. 2.12 e também citadas por Strohaecker (2005) apresentam conclusões de que tensão média apresenta influência considerável na taxa de propagação da trinca.

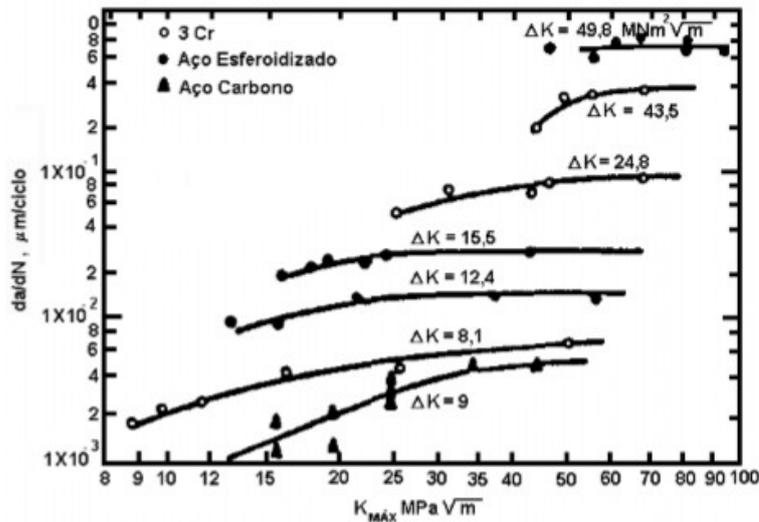


FIGURA 2.13 – A influência de $K_{\text{máx}}$ na taxa de propagação de trinca em fadiga por estriações para diversos aços.

FONTE – STROHAECKER (2005).

- Influência da microestrutura:

Strohaecker (2005) reuniu uma série de observações, obtidas da literatura, sobre a influência da microestrutura na propagação das trincas de fadiga:

Na região II do gráfico, FIG. 2.12, foi constatado que inclusões e partículas intermetálicas só aceleravam o crescimento de trinca por fadiga para a região de crescimento de trinca mais elevado (altos valores de ΔK). Observando-se o comportamento de um aço baixa liga submetido a um tratamento térmico que induza fragilidade de revenido, percebe-se um aumento na taxa de propagação da trinca. O mesmo ocorre com tratamentos térmicos que envolvam altas temperaturas de austenitização seguido de um resfriamento lento.

Já na região III do gráfico, FIG. 2.12, Strohaecker (2005) cita um estudo feito acerca dos aços de alto hidrogênio que apresenta o resultado da alta taxa de propagação de trinca de fadiga em temperaturas menores que a de transição e o fato se justifica pela associação à formação de trincas de clivagem nucleadas nos contornos dos carbeto.

A tabela 4.4 deste trabalho apresenta os valores dos limites superiores de C e m para uma grande variedade de aços estruturais na lei de Paris, variando a microestrutura de uma extensa variedade de aços segundo (DOWLING, 1999; OSGOOD, 1982). A FIG 2.14, apresenta as

retas correspondentes a estes valores de C e m no domínio de validade da lei de Paris (10-5 a 10-3 mm/ciclo) em um gráfico bilogarítmico.

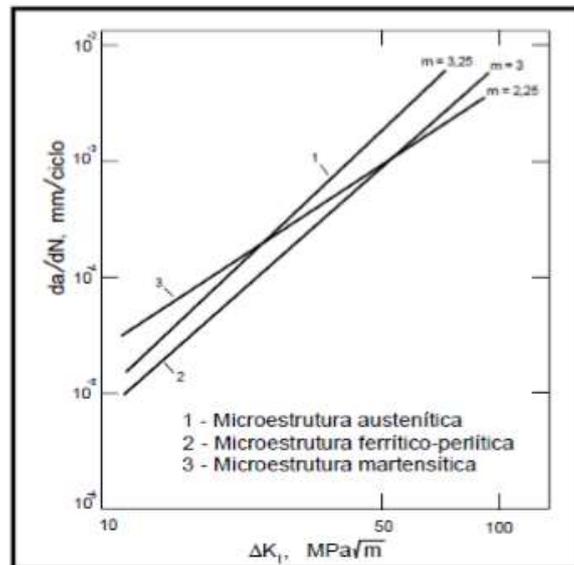


FIGURA 2.14 – Influência da microestrutura na velocidade de propagação de trincas de fadiga nos aços.
FONTE – DOWLING, 1999; OSGOOD, 1982.

- Influência da espessura:

No que se refere à influência da espessura na taxa de propagação das trincas de fadiga, alguns autores contestaram experimentos semelhantes já desenvolvidos por apresentarem resultados contraditórios aos seus e de outros pesquisadores.

Um Estudo de Richards e Lindley (1972) reportou uma pequena influência da espessura na velocidade de propagação de trinca por fadiga quando o nível de tensões era menor que 70% da tensão de escoamento. Ensaios nestas condições para um aço coalescido com espessura variando entre 1,5 e 19 mm mostraram uma diferença desprezível na taxa de propagação de trinca.

A propagação pelo mecanismo de formação de estrias deve ser governada pelo deslocamento plástico cíclico até a ponta da trinca (STROHAECKER (2005)). O deslocamento em estado de tensão plana é bem maior do que em deformação plana, assim, é teoricamente esperado que a taxa de propagação no estado de tensão plana venha a ser maior do que a do estado de deformação plana. Strohaecker (2005) verificou que quando não operava o mecanismo de

propagação por estriações havia uma influência marcante da espessura (FIG. 2.15). É que o micromecanismo de fratura por clivagem é incentivado pelo aumento da constrição plástica que acompanha o aumento da espessura.

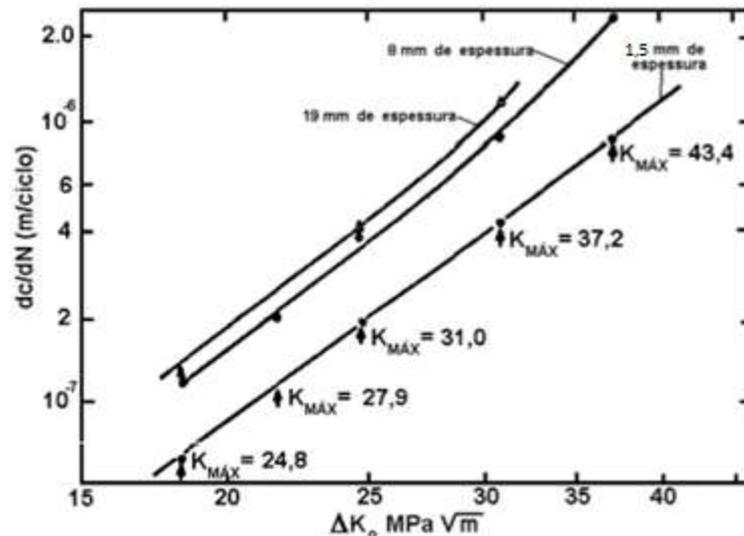


FIGURA 2.15 – Comparação da taxa de propagação de trinca em fadiga para um aço perlitico com espessuras de 1,5; 8 e 19 mm.

FONTE – RICHARDS e LINDLEY, 1972.

2.3.5 Principais falhas em equipamentos de mineração

Como os equipamentos da indústria da mineração estão inseridos em um meio extremamente agressivo e sujeitos à uma gama extensa de condições externas, pode-se inferir que a maioria das falhas estão relacionadas à sobrecarga operacional a que os equipamentos são submetidos e à abrasividade causada pelo atrito contínuo dos componentes com o minério e fadiga estrutural.

Essa citação pode ser ilustrada com a FIG. 2.16 que representa uma FTA (Failure three analysis), ferramenta bastante utilizada na gestão de manutenção (VALE, 2017).

Tal ferramenta consiste em relacionar e estruturar, através de blocos e níveis, as falhas e cada uma de suas causas primárias, secundárias e até terciárias afim de permitir indentificar aquela denominada causa raiz ou fundamental dos modos de falha. Após a identificação, outras ferramentas são aplicadas para tratar o problema através de ações corretivas e preventivas objetivando evitar a reincidência do modo de falha.

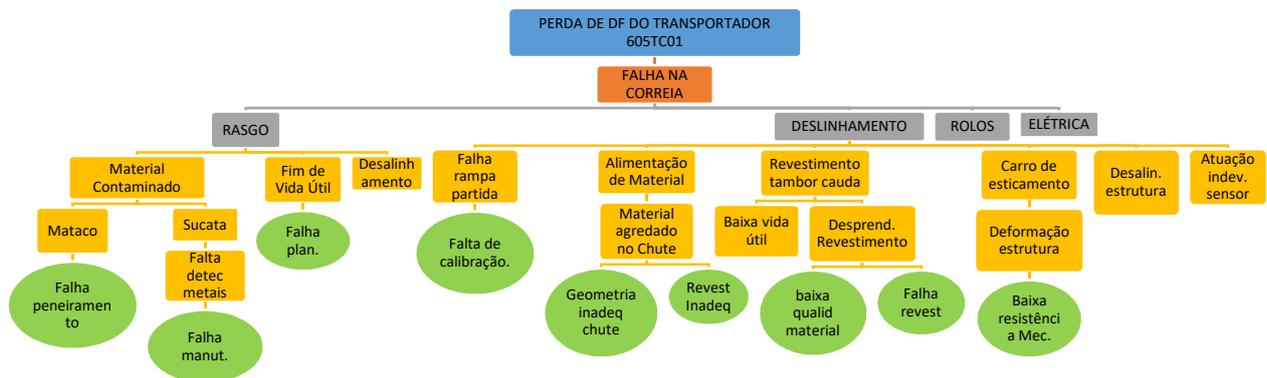


FIGURA 2.16 – FTA típico de um equipamento da indústria da mineração.

FONTE – VALE, 2017.

A árvore de análise de falha apresentada acima, ilustra as falhas primárias (rasgo da correia, desalinhamento da correia, falha em rolos, falha elétrica) e secundárias (material contaminado, desgaste em revestimento de tambores, desalinhamento da estrutura, falha de inversor de frequência, etc) que geraram a perda de disponibilidade física (DF) de um transportador de correias.

Os equipamentos de mineração possuem, em grande parte deles, similaridade em seus modos de falhas. Tal fato se justifica pelo meio e carga mecânica de trabalho em que os equipamentos estão inseridos.

Sinha e Mukhopadhyay (2013) fizeram uma pesquisa sobre os principais tipos de falhas de um britador primário de uma planta de beneficiamento de minério de ferro. Os autores concluíram que, por se tratar de um equipamento extremamente robusto e com elevada resistência mecânica capazes de suportar cargas oriundas de rocha primária, o principal modo de falha era o desgaste e isto pode ser visto na tabela 2.1.

TABELA 2.1

Detalhamento das falhas de um Britador

Descritivo das Funções do Sistema de um Britador				
Componente	Função do componente	Falha funcional do componente	Modo de falha	Efeito da falha
Carcaça	Cominuir o minério	Avaria da carcaça	Impacto súbito	Interrupção da britagem
Revestimento da carcaça	Proteger a carcaça	Avaria do revestimento	Desgaste	Redução da performance de britagem
Vedação	Proteger os mancais e rolamentos	Desgaste	Desgaste	Contaminação por poeira das partes dinâmicas
Eixo principal	Quebrar a rocha	Avaria do eixo	Impacto súbito	Interrupção da britagem
Revestimento do eixo	Proteger o eixo	Avaria do revestimento do eixo	Desgaste	Redução da performance de britagem
Tubulação de óleo lubrificante	Suprir óleo do reservatório para diferentes partes	Avaria da tubulação de óleo	Quebra da tubulação	Lubrificação ineficiente consequentemente provocando falha de outros componentes
Óleo lubrificante	Lubrificação das partes móveis	Perda das propriedades lubrificantes	Poeira e mistura de contaminantes	Lubrificação inadequada consequentemente provocando falha de outros componentes

FONTE - SINHA e MUKHOPADHYAY, 2013.

Em outro estudo sobre falhas em britadores, Sinha e Mukhopadhyay (2015) enumeram e associam os riscos de defeito em cada componente às ações de priorização de manutenção. Os autores afirmam que o ganho de confiabilidade e redução do número de falhas em equipamentos podem ser alcançados a partir da aplicação das ferramentas de confiabilidade tais como FMEA (Failures Modes and Effects Analysis) e RPN (Risk Priority Number). Cada modelo contribui com a melhoria dos indicadores de manutenção e como é baseado em consequências, decisões devem ser tomadas para definir a melhor estratégia de manutenção.

Zheng et al. (2015) apresentaram um estudo sobre a análise de falha ocorrida na estrutura do chassis de caminhões de grande porte utilizados na mineração. Tais caminhões são sujeitos às mais severas condições de trabalho devido ao transporte de rochas de variados tamanhos e formas além das precárias condições das pistas de rolamento existentes ao longo da mina. Diante de todas essas condições adversas, em pouco tempo de trabalho foram identificadas trincas nas regiões da ligação do feixe de molas com o chassis dos caminhões. Para identificar as causas da falha foram realizados estudos das tensões atuantes através da análise por

elementos finitos (FEA), testes estáticos e testes dinâmicos sendo que para estes últimos foi feita a instalação de strain gauges tipo roseta nos pontos mais críticos previamente identificados pela FEA. Com os resultados dos testes, os autores conseguiram determinar um fator de correção para relacionar as tensões estáticas com as tensões dinâmicas. A causa raiz da falha foi determinada e ações de correção foram propostas, dentre elas melhorias no projeto do chassi do caminhão afim de reduzir a concentração de tensões em pontos específicos.

Em mais um caso sobre falha em caminhões utilizados na mineração, Guosheng e colaboradores (2012) apresentam um estudo sobre a análise de falha ocorrida nas barras estabilizadoras do sistema de suspensão desses veículos.

Os autores realizaram análises por simulação de elementos finitos em que foram aplicadas diversas condições de carregamento e identificaram que as tensões verdadeiras atuantes na região da falha possuíam magnitude superior à tensão admissível do material da barra estabilizadora. Outra causa raiz identificada foi relacionada às frequências de trabalho de alguns componentes da estrutura do sistema de suspensão do caminhão que apresentaram valores próximos às frequências naturais. Para solução do problema, foi sugerido o aumento da rigidez do conjunto da barra estabilizadora através da substituição do material da barra por um outro de maior resistência mecânica e substituição da borracha de torsão por uma de maior dureza.

Metso (2002) relata que grande parte do estudo e projeto de alimentadores de sapata se concentram em desenvolver o equipamento cada vez mais robusto capaz de suportar a agressividade que é imposta na mineração. A principal preocupação concentra-se em selecionar materiais de alta tenacidade à fratura, pois componentes como as sapatas e links da corrente de tração estão sujeitos a constante impactos de minérios de maior granulometria.

De uma maneira geral, as principais falhas ocorridas em alimentadores de sapatas estão relacionadas com a causa primária que é o desgaste. O equipamento trabalhando continuamente em contato com o material abrasivo (minério de qualquer natureza) sofre redução de massa dos componentes o que afeta de maneira secundária a resistência estrutural do conjunto.

Na FIG. 2.17 é apresentado um caso típico de falha do elo da corrente de um alimentador em que o desgaste das sapatas provocou a entrada do minério em frestas que foram preenchidos

provocando o maior tensionamento do conjunto de correntes. A consequência foi a sobrecarga e fratura de um dos elementos de ligação (VALE, 2016).



FIGURA 2.17 – Quebra do elo da corrente de um alimentador de sapatas.
FONTE – VALE, 2016.

Outro tipo de falha, não muito comum, em alimentadores de sapatas está relacionado com a fadiga, conforme mostrado na FIG. 2.18. Os eixos motrizes e movidos do equipamento requerem um cuidado especial com o emprego de técnicas de manutenção preditiva para mitigar o risco de grandes paradas em função deste tipo de falha, haja visto que o tempo de reparo é extremamente elevado devido a robustez do equipamento.



FIGURA 2.18 – Quebra do eixo motriz de um alimentador.
FONTE – VALE, 2016.

2.3.6 Falhas em recuperadoras de minério

Por se tratarem de equipamentos de grande porte e serem compostos de diversos sistemas de funcionamento, as recuperadoras de minério estão susceptíveis a variadas falhas: Fraturas, desgaste, corrosão, fadiga, etc.

Ghosal et al. (2008) desenvolveram um trabalho aprofundado sobre as falhas em recuperadoras de minério motivados pelo grave acidente ocorrido com uma recuperadora de grande porte em uma mineradora de ferro da Índia. O equipamento sofreu um colapso estrutural em seu mastro principal. Investigações e uma série de análises dentre as quais: metalográfica, estática e dinâmica dos esforços atuantes e de fadiga, concluíram que a causa primária foi a condição inadequada do caminho de rolamento (trilhos) com conseqüente acréscimo de carga por choques à estrutura da máquina.

Um estudo apresentado por Bosnjak e colaboradores (2011) explora uma falha ocorrida em uma recuperadora de caçambas na mina de Kolubar na Sérvia. Neste caso, houve uma falha catastrófica na estrutura de sustentação do contrapeso da lança da máquina. As primeiras conclusões, foram de que a principal causa da falha foi uma alta concentração de tensão na região das juntas soldadas de elementos importantes combinada com propagação de trinca por clivagem. Os autores concluíram que a combinação de falhas de projeto com falhas de fabricação associadas à condições ambientais adversas tais como ação dos ventos e vibração excessiva contribuíram para aceleração da ocorrência da falha.

Em geral, recuperadoras de minério devem ser extremamente robustas em todos os seus sistemas de funcionamento. Os sistemas de sustentação da estrutura, trucks de locomoção, sistema de giro da lança e roda de caçambas são muito solicitados na operação da máquina.

Bosnjak e colaboradores (2013) apresentaram outro trabalho sobre uma falha no sistema de giro de uma recuperadora de minério de uma mina de carvão na Sérvia. O problema foi o surgimento de várias trincas na junção da viga de sustentação do trilho de giro com a viga da estrutura de locomoção da máquina.

A equipe de manutenção realizou algumas tentativas com o intuito de reforçar as regiões trincadas porém não obtiveram sucesso. Os reforços montados enrijeceram alguns pontos ao passo que as demais regiões permaneceram com a rigidez original. Após poucas horas de trabalho, surgiram novas trincas na estrutura.

Em análise detalhada do problema, foi concluído que a causa principal estava relacionada com concentrações de tensões e a solução foi modificar o projeto da máquina com alterações no dimensionamento e forma das vigas estruturais.

As análises de falhas relacionadas à propagação de trincas em estruturas são cada vez mais exploradas afim de se aprofundar em detalhes construtivos que ajudam a prevenir a ocorrência de danos de grandes proporções causados por tais falhas. Bonsjak e colaboradores (2013) realizaram a investigação de uma falha ocorrida na treliça da estrutura de uma recuperadora de minério onde foi identificado que em determinados pontos a tensão atuante era superior à tensão admissível do material. A principal causa da concentração de tensão era a diferença entre a espessura dos flanges que formavam a treliça, ou seja, abrupta redução de seção.

Os autores concluíram que o efeito da concentração de tensão era mais forte durante a locomoção da máquina do que durante a escavação do minério. Modificações pontuais no projeto da treliça foram sugeridas para corrigir a espessura de flanges adjacentes.

Bosnjak et al. (2011) estudaram as falhas de juntas soldadas em caçambas. Eles demonstraram a importância de se utilizar a metodologia “Fail-safe” para reduzir os custos de manutenção.

Embora grande parte dos eventos de falhas em equipamentos de mineração estejam relacionados à propagação de trincas sob fadiga, Zerbst et al. (2015) mencionaram que a aplicação da mecânica da fratura na manutenção ainda é secundário.

Outro modo de falha recentemente relatado envolvendo recuperadoras de minério, abrange a estrutura da roda de caçamba, VALE (2015) . A roda de caçamba normalmente é projetada para trabalhar em uma faixa característica do minério. As propriedades do minério tais como, granulometria, densidade e grau de compactação interferem diretamente na vida útil dos componentes. Quando alguma das propriedades do minério sai do controle, a máquina será submetida a cargas não compatíveis com a estrutura dos componentes. Neste caso, as falhas mais comuns são: fratura frágil, fadiga e desgaste.

Na FIG. 2.19 mostra o detalhe de uma falha na roda de caçambas de uma recuperadora de minério de ferro em uma mina da Vale em Minas Gerais, Brasil. A falha ocorreu após 2 anos de operação da máquina que foi projetada e fabricada na China e estava operando em uma taxa de produção 30% abaixo para qual foi projetada.

A análise de falha indicou um problema no dimensionamento do componente. As chapas na região do cubo possuíam a mesma bitola e material que o restante da roda e não apresentava nenhum tipo de nervuramento nesta região que é um considerável ponto de concentração de tensões devido ao momento transmitido pelas cargas das caçambas que ficam localizadas na periferia da roda.

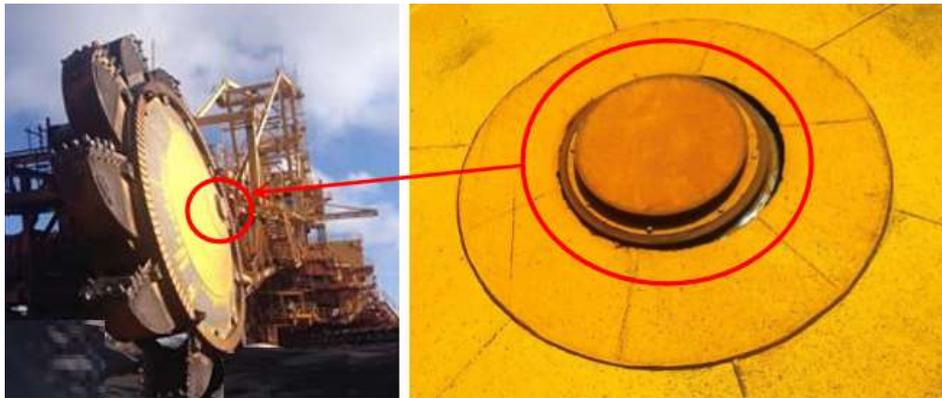


FIGURA 2.19 – Fratura frágil no cubo da roda de caçamba.

FONTE – VALE, 2015.

Por ser um equipamento de elevada solicitação ao processo produtivo, não foi possível retirar amostra para posterior análise química e metalográfica do material. Em um primeiro momento, foram adotadas estratégias para reforçar a estrutura da região da fratura e liberar o equipamento para operar. A FIG. 2.20 mostra o reparo executado pela equipe de manutenção que se resumiu basicamente em soldar nervuras devidamente ensaiadas por END – líquido penetrante. Em momento posterior, a equipe de engenharia desenvolveu o projeto dimensional e de simulação numérica concluindo a necessidade de fabricar nova roda com chapas em bitolas maiores que a original.



FIGURA 2.20 – Reforço estrutural para a roda que falhou em serviço.

FONTE – VALE, 2015.

Outro modo de falha, não muito comum mas de importantes consequências, é a propagação de trincas de fadiga nas caçambas das recuperadoras de minério. Por serem responsáveis pelo ataque ao minério, as caçambas estão sujeitas a vários esforços combinados e a cargas de choque. A FIG. 2.21 mostra uma caçamba que sofreu fratura em sua estrutura pela propagação de trinca de fadiga. O custo deste tipo de falha é alto e vem sendo um ponto importante de análise da equipe de manutenção mecânica.



FIGURA 2.21 – Fratura na caçamba provocada por propagação de trincas de fadiga.
FONTE – VALE, 2016.

Shilpa (2013) desenvolveu um estudo para reduzir as chances de falhas em componentes de uma máquina de dupla função: recuperadora - empilhadeira (stacker – reclaimers) de uma mina de carvão. O estudo foi aplicado em todas as partes e sistemas da máquina. Dentre elas estão relacionadas as estruturas, roda de caçambas e acionamentos mecânicos. O autor, juntamente com a equipe de manutenção, aplicou técnicas de ensaios não destrutivos e instrumentos de monitoramento para prever possíveis falhas na máquina. Concluiu-se desta forma que a aplicação de instrumentação e sistema de proteções eletrônicas contribuem significativamente para a operação de forma segura e redução da ocorrência de falhas.

Complementando os casos citados anteriormente, Zheng et al. (2015) e Feng et al. (2012) mostraram a importância do uso da mecânica da fratura na prevenção e análise de falhas.

Diante da complexidade dos reparos, do impacto financeiro e principalmente do risco para a segurança das pessoas e equipamentos da mineração, ainda é muito importante um estudo sistemático sobre as mais variadas falhas.

Baseado na importante relevância técnica e resultados que podem ser gerados, os fundamentos da mecânica da fratura devem ser amplamente utilizados na manutenção.

2.4 Ensaios não destrutivos

2.4.1 Conceitos preliminares

De acordo com o Instituto Britânico de Ensaios Não Destrutivos (BINDT), ensaios não destrutivos são utilizados para detectar e avaliar descontinuidades nos materiais. Geralmente, os defeitos são caracterizados por trincas, inclusões de materiais no cordão de solda ou ainda variações nas propriedades estruturais, que podem levar à perda da resistência e posteriormente à falha do material.

Para iniciar o estudo sobre ensaios não destrutivos, faz-se necessário o conhecimento da classificação das falhas:

- Descontinuidades são imperfeições que não interferem imediatamente no funcionamento de um equipamento. Como exemplo temos os vazios internos formados na estrutura do material, decorrentes do processo de fundição.
- Defeitos são caracterizados quando os vazios internos citados anteriormente não se restringem à estrutura interna e afloram para a superfície. Um defeito é uma falha em algo que é essencial para o funcionamento de um equipamento.

Os ensaios não destrutivos são usados para inspeção e também para o monitoramento em forma de manutenção preditiva das condições de operação das máquinas. A grande vantagem é o não descarte do material ou estrutura sob teste.

Existem vários tipos de ensaios não destrutivos, cada qual se diferenciando por sua técnica de revelação de falhas e possibilidade de aplicação nas mais variadas peças. A definição da técnica a ser usada depende também da profundidade que espera-se identificar a descontinuidade ou defeito. Desta forma, pode-se aplicar as técnicas de inspeção visual, ensaio por partículas magnéticas, ensaio por líquido penetrante, ensaio por ultrassom, ensaio por radiografia, dentre outros. Neste trabalho, apenas o ensaio por ultrassom será explicado.

2.4.2 Ensaio por ultrassom

De acordo com Andreucci (2011), o ensaio por ultrassom é caracterizado como um método não destrutivo que tem por objetivo, a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos.

Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componentes a ser examinado como, por exemplo: bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro trincas em forjados, escórias em uniões soldadas e muitos outros (CRUZ, MELO E RESENDE, 2011).

As ondas emitidas no ensaio de ultrassom utilizam frequências da ordem de 0,5 MHz a 25 MHz (500.000 Hz a 25.000.000 MHz) que são produzidas através de um transdutor. Os cristais piezelétricos são materiais que têm capacidade de converter pressão mecânica em tensão elétrica e vice-versa. Eles são usados nos transdutores para converter um tipo de energia em outra. Neste caso, converte a energia elétrica de excitação em energia mecânica de vibração com a mesma frequência da energia elétrica. A FIG. 2.22 mostra as etapas do ensaio por ultrassom.

Pela definição da ABENDI (2013), o ensaio de ultrassom caracteriza-se pela reflexão de ondas acústicas quando encontram obstáculos à sua propagação, dentro do material. Tais obstáculos podem ser interpretados como possíveis descontinuidades na peça avaliada.

A instrumentação utilizada no ensaio de ultrassom é composta de transdutores (normal ou reto, angular, e duplo-cristal) além de um acoplante e de um receptor de sinal.

Para Giacaglia e Lamas (2014), o método ultra-sônico possui alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas descontinuidades internas como, por exemplo, trincas devido a tratamento térmico, fissuras e outros defeitos de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes (radiografia ou gama grafia). Para interpretação das indicações, processos intermediários são dispensados, agilizando a inspeção. O ensaio ultra-sônico não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação.

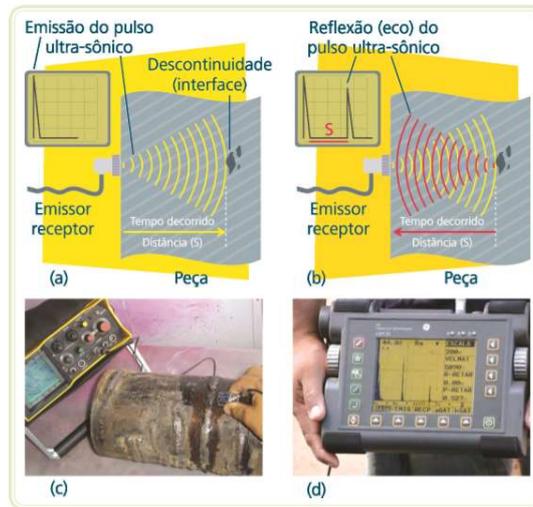


FIGURA 2.22 – a) Emissão do pulso de ultrassom; b) eco gerado pelo reflexo da onda na descontinuidade; c) inspeção de peça por meio de ultrassom e d) detalhe do gráfico formado pela emissão e eco do ultrassom.

FONTE – ZOLIN, p.23, 2011.

Her e Lin (2014) desenvolveram um trabalho que apresenta o procedimento e modelo de cálculo para determinação da profundidade de uma trinca em uma determinada peça. As FIGs. 2.23 (a) e (b) mostram a configuração da incidência do feixe sônico e a representação gráfica reespectivamente.

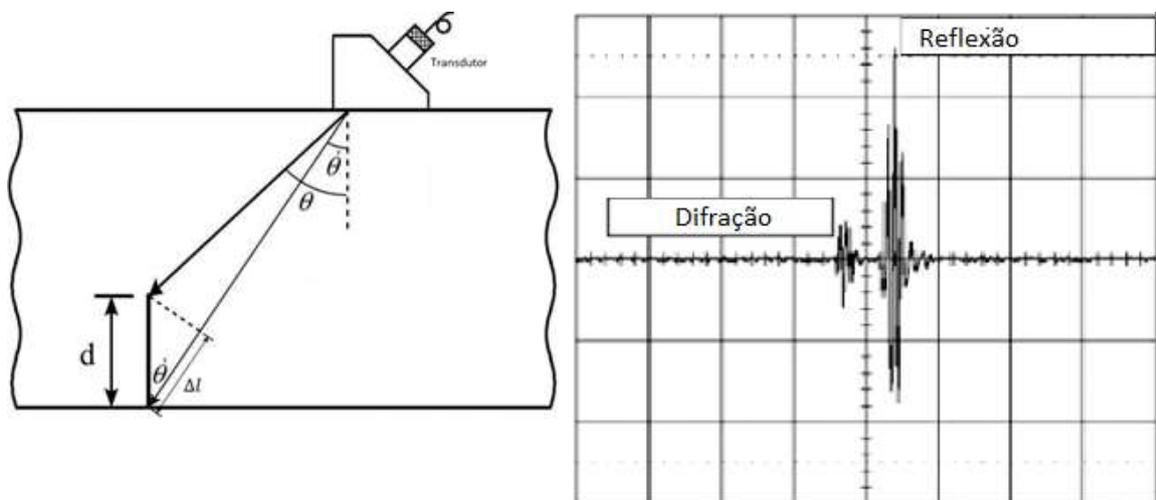


FIGURA 2.23 – a) Configuração do feixe ultra-sônico; b) Ondas de reflexão a partir da superfície da trinca

Ainda de acordo com Her e Lin (2014) o valor da distância entre o ponto da trinca e a superfície da peça pode ser calculado pela Eqs 2.10 e 2.11:

$$\Delta l = \frac{c_s \Delta t}{2} \quad (2.10)$$

$$d = \frac{\Delta l}{\cos \theta} = \frac{c_s \Delta t}{2 \cos \theta} \quad (2.11)$$

Onde:

c_s = Velocidade de incidência da onda.

Δt = É a diferença entre o tempo de reflexão e difração da onda.

Como fatores limitantes ao ensaio, pode-se citar a necessidade de grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor. Faixas de espessura muito finas constituem uma dificuldade para aplicação do método e requer um reparo e relativo grau de acabamento da superfície para sua aplicação.

Em suma, a técnica de ensaio por ultrassom apresenta resultados confiáveis e precisos sendo largamente aplicáveis à indústria, incluindo a aeroespacial (ANDREUCCI, 2011).

3 MATERIAL E METODOLOGIA

A fim de analisar o comportamento estrutural e mecânico das caçambas de uma recuperadora de minério em serviço sob fadiga, foi adotada a metodologia e passos mostrados na FIG. 3.1 visando aplicar os conceitos apresentados no capítulo 2.

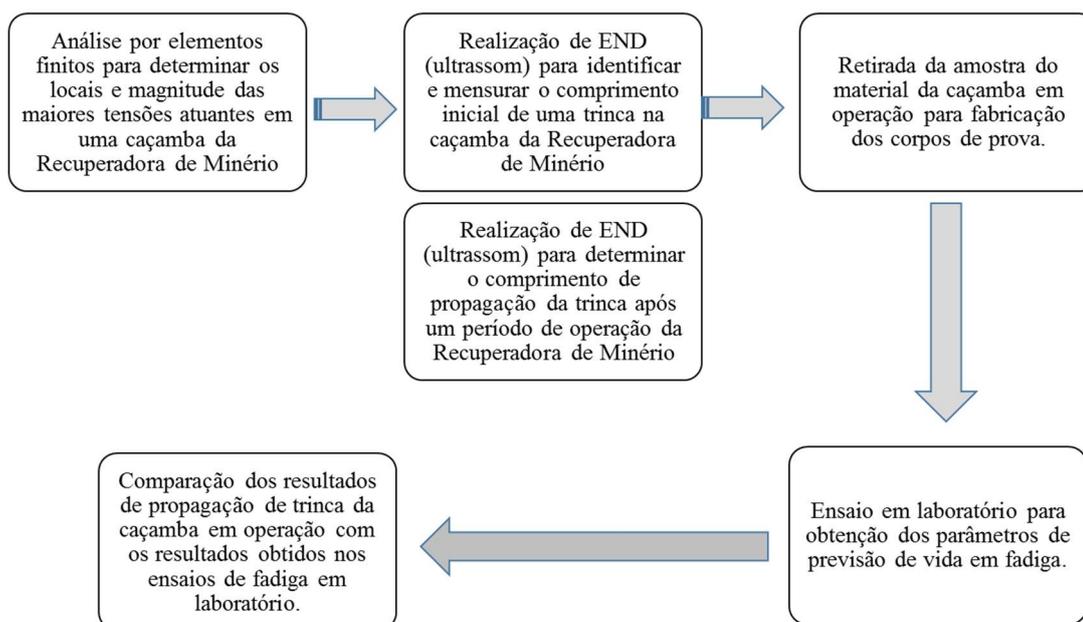


FIGURA 3.1 – Fluxograma da metodologia de análise.

3.1 Ensaio não destrutivo em uma caçamba

A máquina escolhida para realizar o estudo é uma recuperadora de minério em operação em uma unidade da VALE S/A em Nova Lima, MG – Brasil. A recuperadora está em operação desde de 18/09/2015 e sua capacidade de produção definida em projeto é de 11.620 T/h. Este equipamento é constituído de 11 caçambas distribuídas em uma roda com diâmetro externo de 9.785 mm que é acionada por um motor hidráulico sob a rotação de 4,5 RPM . O material da caçamba é o aço estrutural ASTM A572 Gr. 50. A FIG. 3.2 mostra uma secção típica da estrutura da caçamba.

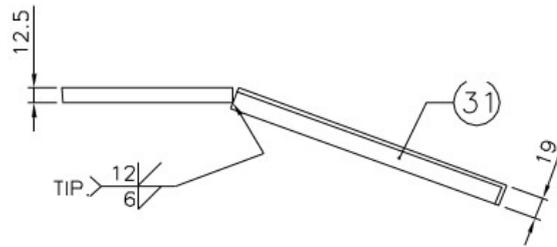


FIGURA 3.2 – Secção típica da estrutura da caçamba.

Aproveitou-se da parada para manutenção preventiva e o posicionamento da lança da máquina, para a escolha de uma caçamba mais acessível afim de executar o ensaio de ultrassom e identificar possíveis trincas para estudo de sua propagação. A FIG. 3.3 mostra, através do ponto vermelho destacado, a caçamba escolhida para realização do END – Ultrassom. A região de varredura está localizada exatamente na chapa de ligação entre a lateral direita e o fundo da caçamba, conforme FIG. 3.5.



FIGURA 3.3 – Caçamba ensaiada.

A região escolhida para varredura e identificação de trinca foi baseada no estudo de esforços por elementos finitos previamente realizado. Os resultados desta análise são apresentados no capítulo seguinte.

Para a análise de esforços por elementos finitos, utilizou-se o software de cálculo estrutural ANSYS, modo Static Structural, type: Equivalent (von-Mises) Stress – Top / Botom. A simulação foi realizada considerando a condição de operação com sobrecarga da caçamba. Tal condição é estabelecida na norma norma ISO 5049-1 (Mobile equipment for continuous handling of bulk materials, item 3.1.2.2). As premissas para análise são: a) recuperação de uma pilha de minério compactada e a caçamba com grau de enchimento máximo; b) Roda de caçambas submetida ao limite operacional do motor hidráulico (responsável pelo acionamento)

com torque específico igual a 4.000 Nm / Bar. A pressão de trabalho do sistema hidráulico é 350 BAR.

O equipamento usado para o ensaio foi um MASTERSCAN Series D-70 & 700M, FIG. 3.4, do fabricante Sonatest.



FIGURA 3.4 – Aparelho de ultrassom Masterscan 700M.

A tabela 3.1 apresenta as principais características técnicas do instrumento de ultrassom utilizado para o ensaio.

TABELA 3.1
Caraterísticas técnicas do instrumento de ultrassom

SONATESTE MASTERSCAN Series D-70 & 700M ESPECIFICAÇÕES	
Faixa de teste	0-1mm(0.05in) à 0-20,000 mm(800 in.) em aço à 5930m/s (19455f/s)
Velocidade	256 - 16000 m/s continuamente variável
Sonda zero	0 à 999,999 µs.
Atraso	0-20,000m (800in) em aço à 5930m/s.
Ganho	0 à 110dB ajustável em 0.1, 0.5, 1, 2, 6,14 e 20dB.
Modo de teste	Pulso do eco e transmissor / receptor. Cristal único, duplo cristal e Pitch-Catch.
Amortecimento	50 e 400 Ohm amortecimento selecionável.
Pulsador	100-450V -onda quadrada. Largura do pulso de 35nS à 250nS Tempo de subida / descida <15nS em carga de 50R.
Borda ativa	Modo de borda ativa para melhorar solução próximo à superfície.
P.R.F	Ajustável 5Hz à 5kHz. Sincronismo externo disponível
Taxa de atualização do display	60Hz
Retificação	RF, onda completa, +ve meia onda, -ve meia onda.
Frequência das bandas de filtragem	i) 100kHz - 500kHz ii) 200kHz - 800kHz iii) 0.4MHz - 1.6MHz iv) 1.4MHz - 3MHz v) 3MHz - 8MHz vi) 7MHz - 15MHz vii) 9MHz - 21MHz viii) 1.6 MHz - 22 MHz
Linearidade do sistema	Vertical = 0.5% Full Screen Height (FSH). Horizontal +0.2% Trace Full Screen Width (FSW).
Rejeição selecionável	Acima de 80% rejeição linear (revolve ruídos sem afetar indicação de amplitude) ou acima de 50% rejeição supressiva (aumenta a config. Do zero e reduz a amplitude de todo o eco) LED de advertência quando ativo.
Unidades	Metrico (mm), inch (in) ou microsegundos.
Display	Colour Transflective VGA (640 x 480) TFT Area do display: 116.16 x 87.2 mm (4.57 x 3.43 in). Area A-Scan : 400 x 510 pixels (normal), 460 x 620 (FS). Cores: 9 colour options with variable brightness.
Porta do monitor	Duas portas independentes para medição e monitoramento. Início com largura totalmente ajustável além da faixa inteira do instrumento. Níveis de ajuste de 0% a 100%, positivo ou negativo desencadeando em cada porta com alarmes visuais e sonoros. Resolução das portas é 5nS.
Modos de medição	Modo 1 Sinal do monitor, alarme da porta pode ser ativo mas não medido quando mostrado. Mode 2 Profundidade e amplitude do primeiro sinal da porta. Mode 3 Medições da distância Echo-Echo. Mode 4 Exibição trigonométrica no caminho do feix, distância da superfície (incluindo X-offset) e indicador de profundidade a partir da superfície de indicação junto com a amplitude do eco. correção pode ser aplicada para superfície côncava e convexa. Mode 5 Medição de distância porta a porta. Mode 6 Flanco a flanco Mode 7 Angulo do feixe, calculado a partir do caminho do feixe, raio completo e centro da profundidade. Exibição da medição em tempo real com atualização no visor 3 X / seg.

O ensaio foi feito com o auxílio de um técnico especializado em inspeção preditiva que utilizou o instrumento supracitado e os acessórios: cabeçote de duplo cristal modelo DL4R 0° (que é o mais adequado para chapas de baixa espessura e onde se espera encontrar descontinuidades próximas as superfícies), cabeçote angular modelo SMA4-60ZR 60° e cabeçote angular modelo SMA4-70ZR 70° (que são os mais adequados para melhorar o acoplamento e minimizar as interferências da recepção do sinal).

As FIGs. 3.5 (a) e (b) mostram a execução do ensaio por ultrassom e o ponto da trinca identificada.



FIGURA 3.5 – a) Execução do ensaio de ultrassom; b) Ponto da trinca identificada.

Após 120 dias (2.688 horas) de operação da máquina, foi realizado um novo ensaio no mesmo ponto para avaliar o novo tamanho da trinca previamente identificada. O tamanho da trinca foi determinado pelo método da queda dos 6 dB em que o método é aplicado nas extremidades da descontinuidade, considerando-se o eco mais próximo em cada extremo.

3.2 Ensaio de fadiga de amostras obtidas da caçamba em operação

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga em laboratório foram fabricados com material retirado de uma caçamba substituída por manutenção, FIG. 3.6.



FIGURA 3.6 – Caçamba utilizada para obtenção de amostras do material para ensaio de fadiga.

3.2.1 Máquina de ensaio de fadiga universal

Os ensaios de fadiga foram realizados em uma máquina INSTRON modelo 8802. Este equipamento é constituído de sistema de teste servo hidráulicos e equipada com o controlador

digital 8800, software de console e as células de carga Dynacell™. O software para testes dinâmicos WaveMatrix™ proporciona a interface básica para execução de muitos testes dinâmicos.

A máquina de ensaios universal INSTRON, modelo 8802 B1, está equipada de um sistema dinâmico com capacidade máxima de 250 kN, garras de cabeçote e levantamento hidráulico da travessa com distância máxima 1.515mm e mínima de 316 mm, controlador eletrônico digital de carga e posicionamento, construído em torre modular para cinco controladores ou placas de aquisição de dados.

Cada sistema de aquisição de dados pode acomodar até oito transdutores adicionais, controlador eletrônico digital com atualização dos parâmetros de (PID) automático até 1kHz, processamento digital de sinais com a resolução de 19 bits sem a necessidade de ajuste manual ou supressão, condicionamento de sinal do transdutor de alta exatidão, baixo ruído com filtros variáveis de 0 até 1 kHz.

3.2.2 Sistema de aquisição de dados

A máquina INSTRON 8802 situada no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da UFMG possui o software FastTrack 2, o qual contém uma série de programas e aplicativos projetados para atender aos requisitos de testes estáticos e de fadiga, em sistemas servo hidráulicos. Um destes programas é o software da/dN (Fatigue Crack Propagation) que proporciona um sistema de controle, aquisição de dados, realiza os cálculos e apresenta os resultados em tempo real, em conformidade com a norma ASTM E647 (2008).

A INSTRON 8802 também é equipada com um controlador 8800MT digital que fornece controle completo do sistema, incluindo recursos como ajuste de loop automático, controle de amplitude, proteção de amostra, resolução de 19 bits em toda a gama de transdutores e tecnologia de controle adaptativo. A máquina permite ainda, o acesso a outros softwares específicos da aplicação, como o conjunto de fadiga de ciclo baixo ou mecânica de fratura.

3.2.3 Corpos de prova

Os corpos de prova do tipo compacto de tração (CT) foram fabricados de acordo com o estabelecido pelas normas ASTM E647 (2008) e ASTM E1820 (2001). Como já explicado anteriormente, a matéria prima utilizada foi o aço ASTM A572 Gr 50 extraídos de uma caçamba em operação. As dimensões dos corpos de prova são mostradas na FIG. 3.7.

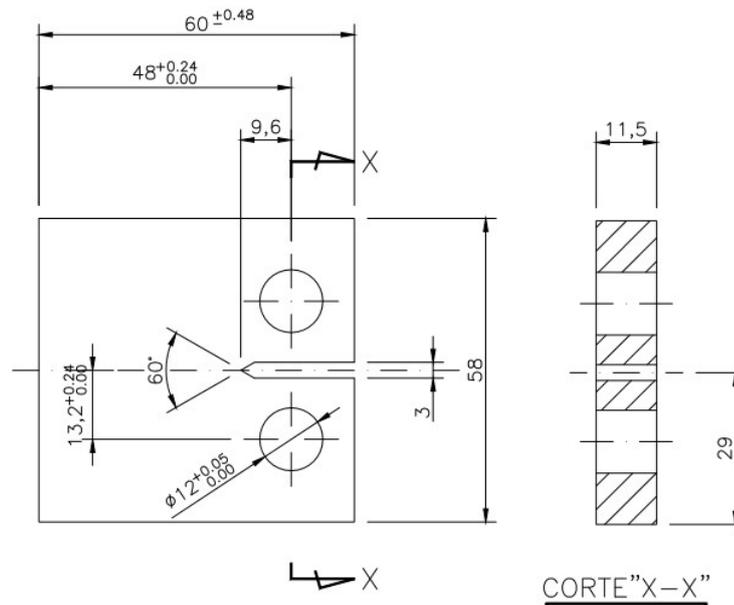


FIGURA 3.7 – Dimensões do corpo de prova tipo compacto de tração (CT) utilizado nos ensaios de propagação de trinca por fadiga.

FONTE - ASTM E647 (2008).

As amostras do material foram extraídas das chapas laterais da caçamba por serem de maior dimensão e não possuírem revestimentos contra abrasão. Foi utilizado equipamento de corte por oxigênio em que duas chapas nas dimensões 400 mm X 400 mm foram obtidas. Em seguida, os corpos de prova foram fabricados utilizando as máquinas operatrizes de usinagem: serra de fita, plaina de mesa e fresadora CNC. As chapas que possuíam espessura original de 12,7 mm foram usinadas até a espessura de 11,5 mm para correção de imperfeições e pontos desgastados por abrasão. O acabamento final foi realizado com lixas de diferentes granulações.

As propriedades mecânicas e características químicas do material ensaiado são apresentadas nas tabelas 3.2 e 3.3 respectivamente.

TABELA 3.2

Propriedades mecânicas especificadas do aço ASTM A572

Material	Grade	Limite de Escoamento	Limite de Resistência à Tração	Alongamento	
		MPa (ksi)	MPa (ksi)	min. 200 mm %	min. 50 mm %
ASTM A572	50	> 345 (50)	>450 (65)	18	21

FONTE – Steel grades American Standards (2011).

TABELA 3.3

Composição química especificada do aço ASTM A572

Composição Química - Elementos Principais					
Material	C max. %	Mn %	S max. %	P max. %	Si %
ASTM A572	0.23	≤1.35	0.05	0.04	≤0.40

FONTE – Steel grades American Standards (2011).

A fim de permitir a perfeita montagem do Clip Gage do sistema de aquisição de dados, foi necessário usinar a extremidade da fenda do corpo de prova, formando um “rabo de andorinha”, FIG. 3.8.



FIGURA 3.8 – Corpo de prova do tipo tração.

Foram realizados ensaios em cinco corpos de prova, sendo que em três deles foram concluídos com sucesso. O ensaio do primeiro e do terceiro corpo de prova foi interrompido no momento da pré-trinca, pois esta tomou direção com desvio angular acima do estabelecido em norma. A FIG. 3.9 mostra o corpo de prova montado na máquina de ensaio de fadiga no momento que o teste estava em plena carga.



FIGURA 3.9 – Corpo de prova montado na máquina de ensaio de fadiga.

3.2.4 Pré-trinca por fadiga

Para a execução do ensaio de propagação de trinca, a norma ASTM E647 (2008), estabelece que deve-se ter uma pré-trinca mínima de comprimento igual a igual a $0,1B$, ou a $0,06W$ ou comprimento de 1,0 mm.

Para realizar a abertura dessas pré-trincas, calculou-se o valor de carga máxima utilizando a norma ASTM E 1820 (2001). A norma estabelece que o valor de carga máxima não pode exceder P_f , que pode ser obtido pela EQUAÇÃO (3.1)

$$P_f = \frac{0,4B(W-a_0)\sigma_e}{2W+a_0} \quad (3.1)$$

A carga máxima será 70% de P_f ou seja,

$$P_{max} = 0,7 P_f \quad (3.2)$$

As pré-trincas de fadiga foram nucleadas com razão de carga de $R = 0,1$, frequência de 30 Hz e à temperatura ambiente. A fase de pré-trincamento foi iniciada com valores de P_f entre 10 e

12 kN, porém com a dificuldade de nucleação e estabilização da taxa de propagação, valores menores foram adotados seguindo as recomendações da norma ASTM E1820 (2001).

Após a nucleação, seguiram-se as recomendações da norma ASTM E647 (2008), diminuindo a carga em degraus de 20% a fim de atingir uma pré-trinca de 3 mm e um valor de P_f final do pré-trincamento igual ao valor de P_f utilizado no ensaio. Os valores de amplitude de carga aplicados para o primeiro, segundo e terceiro estágios da pré-trinca foram 7,5, 6,0 e 4,8 kN, respectivamente. A amplitude de carga de 4,8 kN correspondente ao terceiro estágio foi a base para selecionar a amplitude de carga utilizada no ensaio de propagação de trinca.

A medição do comprimento das pré-trincas foi obtido pelo software de aquisição de dados da máquina de ensaio de fadiga e também feita de maneira visual, realizando marcações de 1,0 mm para cada estágio na superfície do corpo de prova. A FIG 3.10 mostra um corpo de prova com a pré-trinca concluída.



FIGURA 3.10 – Pré-trinca do corpo de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de propagação de trinca por fadiga podem ser apresentados através da taxa de propagação de trinca (da/dN) vs do fator de intensidade de tensões (ΔK), pelo tamanho da trinca vs número de ciclos, pela taxa de propagação da trinca (da/dN) vs número de ciclos e ainda pelo fator de intensidade de tensões (ΔK) vs número de ciclos.

Em primeiro momento, serão apresentados os resultados do comportamento do crescimento da trinca vs número de ciclos para os dois ensaios aplicados: Ultrassom em duas etapas na caçamba da recuperadora de minérios durante seu uso em serviço e propagação de trinca por fadiga realizado em laboratório.

Em seguida, serão apresentados os resultados da taxa de propagação de trinca (da/dN) em função do fator de intensidade de tensões (ΔK) e parâmetros característicos do material utilizado na fabricação das caçambas.

4.1 Resultados da análise por elementos finitos

A partir do desenho da caçamba, foi realizada a simulação por elementos finitos a fim de determinar os locais mais prováveis para a ocorrência de trincas.

A FIG. 4.1 mostra, através de uma plotagem utilizando o software ANSYS, que a chapa que faz ligação da região de ataque inferior com as laterais da caçamba está sujeita a maiores tensões. O ponto vermelho indica o local com os maiores valores de tensões atuantes na caçamba.

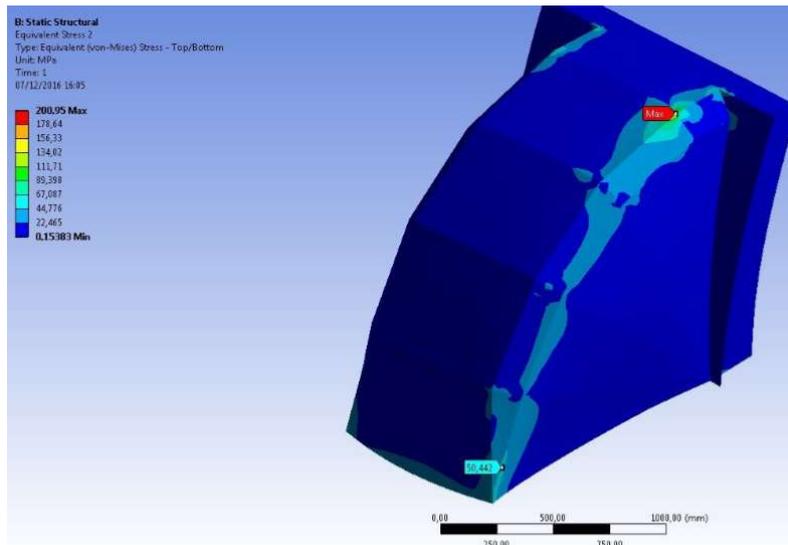


FIGURA 4.1 – Plotagem de tensões para operação com sobrecarga.

4.2 Resultados dos ensaios de ultrassom

O ponto exato da trinca identificada na caçamba foi obtido através da criação de um sistema de coordenadas e determinação do ponto de origem mostrado na FIG. 4.2. As cotas da localização da trinca são:

Eixo X = -60 mm

Eixo Y = 200 mm

Eixo Z = - 6,1 mm

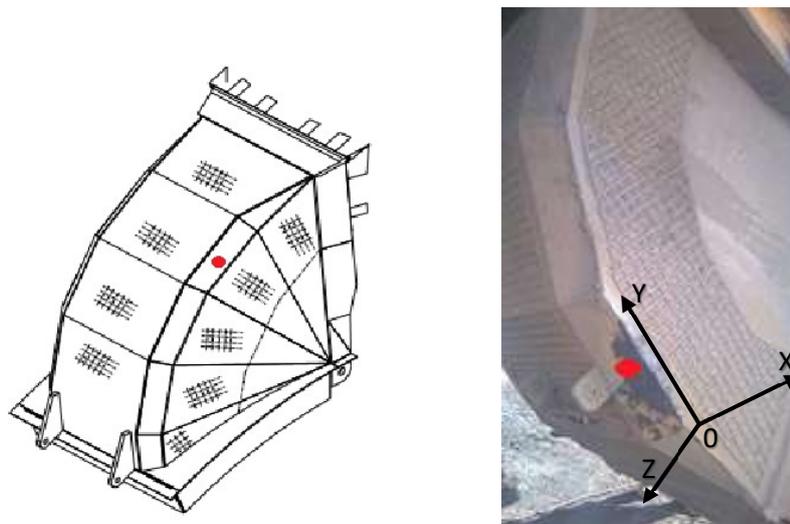


FIGURA 4.2 – Ponto da trinca identificada.

Para indicação do ponto da trinca no eixo Z, faz-se necessária a interpretação dos resultados de varredura dos cabeçotes do equipamento de ultrassom tais como percurso do som, distância de referência e superfície de detecção. As FIGs. 4.3 e 4.4 mostram o esquema de posicionamento dos cabeçotes mencionados no item 3.1 (0°; 60°; 70° indicados pelos números 1; 2 e 3 respectivamente) e o resultado do ponto de localização da trinca no eixo Z.

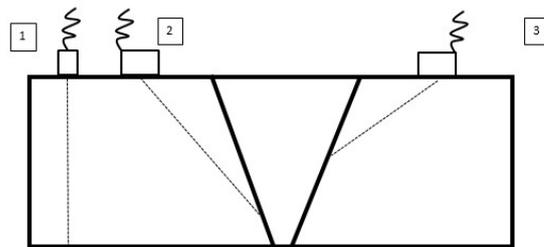


FIGURA 4.3 – Superfície de varredura ultrassom e posicionamento dos cabeçotes.



FIGURA 4.4 – Resultado da localização da trinca no eixo Z.

Os resultados do primeiro ensaio de ultrassom indicaram que a trinca se iniciava a 7,1 mm e terminava a 5,1 mm da superfície da chapa (eixo Z, espessura da chapa). O valor médio foi determinado e a posição da trinca no eixo Z foi igual a -6,1 mm. O comprimento inicial (a_0) detectado no primeiro ensaio foi de 17,8 mm. Após 2.688 horas de operação (valor obtido pelo software de monitoramento da recuperadora de minério) repetiu-se a medição da trinca. O comprimento (a) detectado neste segundo ensaio foi de 59,94 mm. Ou seja, a trinca propagou 42,14 mm durante este período de operação da recuperadora de minério.

Conforme o esquema de localização mostrado na FIG. 4.5, a trinca se propagou com uma inclinação de aproximadamente $6,45^\circ$ e no instante da segunda medição seu ponto final estava a 2,2 mm da superfície da chapa ensaiada. Essas informações permitem analisar e concluir que o comprimento total da trinca ao atingir a superfície da chapa fique em torno de 62,31 mm.

Os critérios de medição utilizados foram baseados na norma NBR 6002 e procedimentos de END, PR-011 e PR-015 da ABENDI (Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção). Para o dimensionamento da altura da trinca (eixo Z), foi adotado o método da difração máxima amplitude.

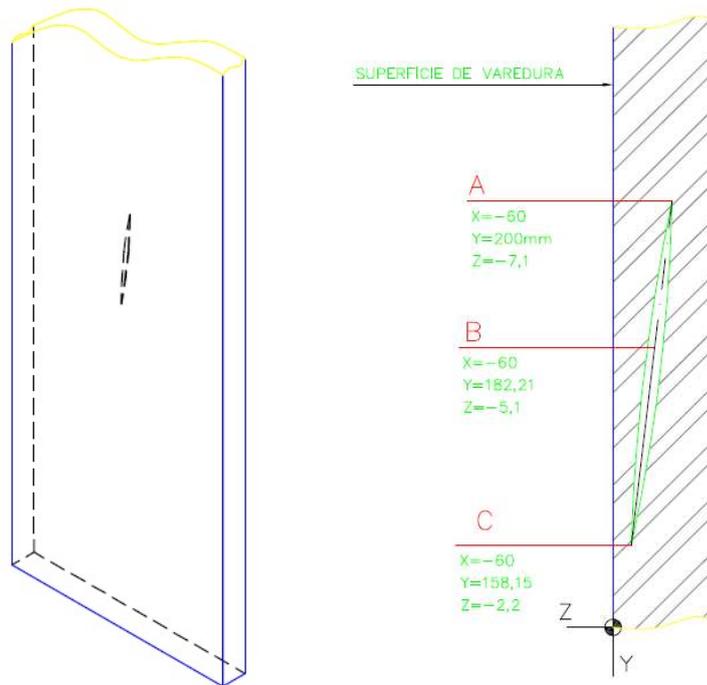


FIGURA 4.5 – Esquema de localização da trinca.

A tabela 4.1 mostra os resultados dos dois ensaios de ultrassom (Nº 1 e Nº 2) realizados em um intervalo de 120 dias (2.688 horas de operação da máquina).

TABELA 4.1
Resultado dos ensaios de Ultrassom

DESCONTINUIDADES								
TESTE	CABEÇOTE	AMP. (dB)	LOCAL (mm)	COMPRIMENTO (mm)	PROFUND. (mm)	PERCURSO SOM (mm)	DISTÂNCIA REFERÊNCIA (mm)	LAUDO
2	70	(+) 4,8	65	59,94	6,37	59,94	140,06	R

DESCONTINUIDADES								
TESTE	CABEÇOTE	AMP. (dB)	LOCAL (mm)	COMPRIMENTO (mm)	PROFUND. (mm)	PERCURSO SOM (mm)	DISTÂNCIA REFERÊNCIA (mm)	LAUDO
1	70	(+) 1,7	60	17,8	6,07	17,8	182,2	R

Os relatórios completos dos ensaios de ultrassom são apresentados no anexo A.

4.3 Propagação da trinca vs número de ciclos – Análise ultrassom

Através dos relatórios do histórico de trabalho e características mecânicas da recuperadora de minério, foi possível determinar a aproximação do número de ciclos da caçamba durante o período entre os dois ensaios de ultrassom.

Os relatórios de trabalho são obtidos pelo software de gestão operacional da recuperadora de minério que monitora as horas de trabalho e horas ociosas da cada sistema da máquina. Com ajuda do software é possível saber o número de horas que a máquina deixou de operar por alguma falha funcional que gerou perda de disponibilidade física (DF) ou falha operacional que gerou perda de utilização física (UF) da máquina.

O número de ciclos pode ser obtido pela equação:

$$N_{ciclos} = n * T * DF * UF * 60 \quad (4.1)$$

Onde:

n = rotação da roda de caçambas [RPM]

T = período de trabalho [horas]. Obs.: medido entre o dois ensaios de ultrassom.

DF = Disponibilidade Física da máquina.

UF = Utilização Física da máquina.

Os dados obtidos pelo manual de operação e manutenção, sistema supervisor e observações de campo da recuperadora de caçamba são:

$n = 4,5$ RPM;

$T = 2688$ horas;

$DF = 93\%$;

$UF = 91\%$

Logo o número de ciclos no período entre os dois ensaios de ultrassom foi:

$$N_{ciclos} = 4,5 * 2688 * 0,93 * 0,91 * 60$$

$$N_{ciclos} = 614.211$$

Diante da análise dos resultados da tabela 4.1 e do número de ciclos calculado, observa-se que a trinca cresceu 42,14 mm após 614.211 ciclos de trabalho da caçamba objeto de estudo.

4.4 Propagação da trinca vs número de ciclos – Ensaios em laboratório

Corpos de prova foram confeccionados a partir do material retirado da caçamba da recuperadora para realização de ensaios de fadiga em laboratório.

Três corpos de prova foram ensaiados. A FIG. 4.6 mostra o gráfico da relação entre a propagação da trinca, expressos pela variação do comprimento Δa e o número de ciclos para os três corpos de prova .

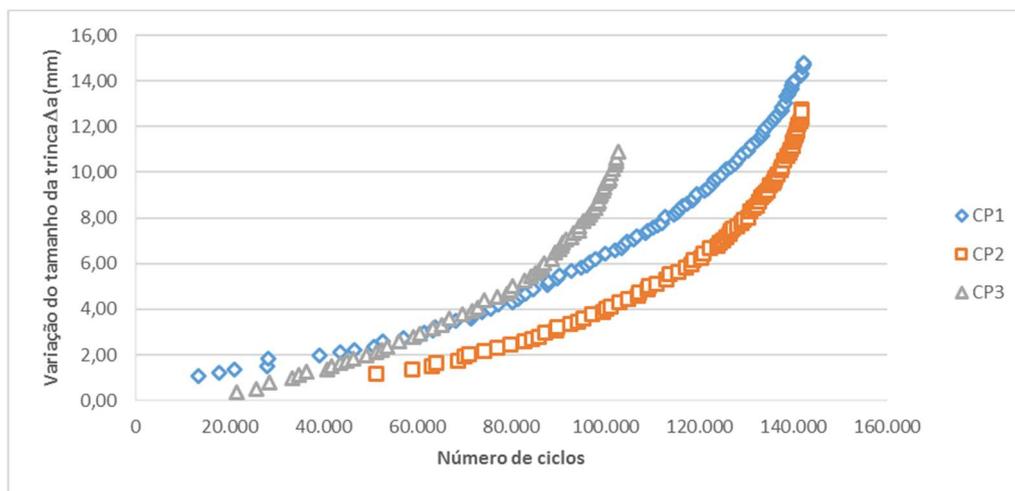


FIGURA 4.6 – Curvas de comprimento da trinca vs. Número de ciclos dos três corpos de prova ensaiados para $R=0,1$ e Frequência de 30Hz.

Os resultados foram obtidos a partir software FastTrack 2 da máquina de ensaio de fadiga INSTRON 8802 mencionada no item 3.2.2 e os gráficos plotados a partir do Excel.

Os resultados do ensaio do CP1 permitem visualizar que houve a propagação da trinca em 13,70 mm após 128.909 ciclos, no caso do CP2 a trinca propagou 11,49 mm após 90.541 ciclos e para o CP3 a trinca propagou 10,5 mm após 81.121 ciclos. As FIGs. 4.7, 4.8 e 4.9 mostram estes resultados. As Eqs. (4.2), (4.3) e (4.4) apresentam as funções que determinam a relação entre a variação do crescimento da trinca e o número de ciclos para os corpos de prova CP1, CP2 e CP3 respectivamente.



FIGURA 4.7 – Equação do comprimento da trinca vs. Número de ciclos para o CP1, para R=0,1 e Frequência de 30Hz.

$$\Delta a = 2E - 06N^{1,3103} \quad (4.2)$$

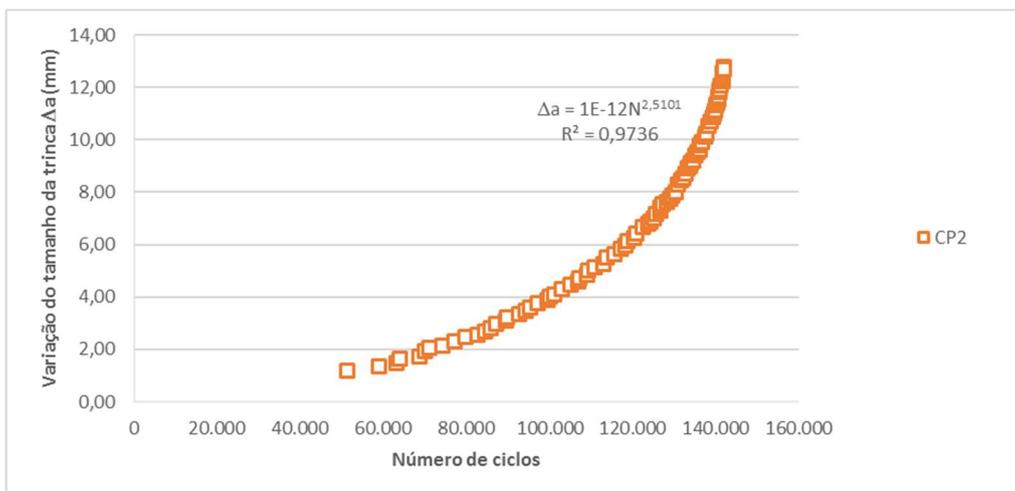


FIGURA 4.8 – Equação do comprimento da trinca vs. Número de ciclos para o CP2, para R=0,1 e Frequência de 30Hz.

$$\Delta a = 1E - 12N^{2,5101} \quad (4.3)$$

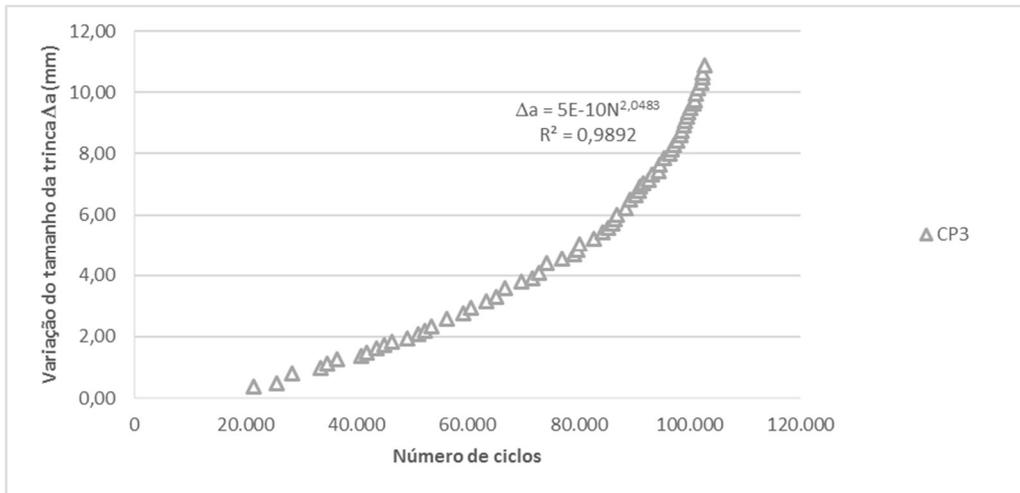


FIGURA 4.9 – Equação do comprimento da trinca vs. Número de ciclos para o CP3, para R=0,1 e Frequência de 30Hz.

$$\Delta a = 5E - 10N^{2,0483} \quad (4.4)$$

Onde:

a = comprimento da trinca propagada [mm]

N = número de ciclos

As Eqs. (4.1), (4.2) e (4.3) foram obtidas através do ajuste de curvas experimentais dos ensaios de laboratório.

4.5 Taxa de crescimento da trinca em função da variação da intensidade de tensões - da/dN vs Δk

A partir dos resultados dos ensaios de laboratório foi possível plotar a curva da velocidade de propagação da trinca da/dN vs o fator da variação de intensidade de tensão ΔK.

A FIG. 4.10 mostra o comportamento das curvas para os 3 CPs ensaiados.

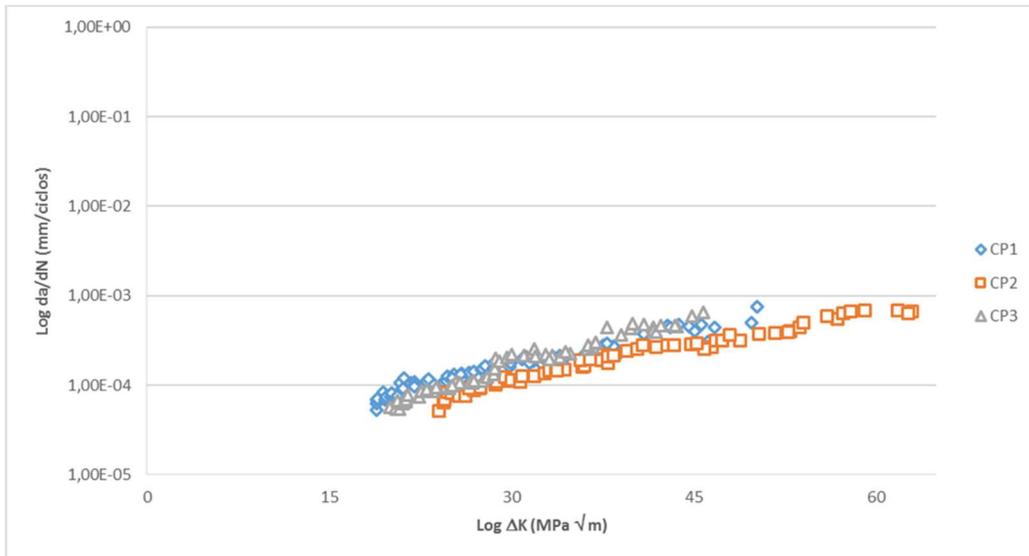


FIGURA 4.10 – Taxa de crescimento da trinca em função da variação de intensidade de tensões para $R=0,1$ e Frequência de 30Hz.

As FIGs. (4.11), (4.12) e (4.13) e as Eqs. (4.5), (4.6) e (4.7) mostram a relação entre da/dN e ΔK dos corpos de prova CP1, CP2 e CP3, respectivamente no formato da Equação de Paris: $da/dN = C(\Delta K)^m$.

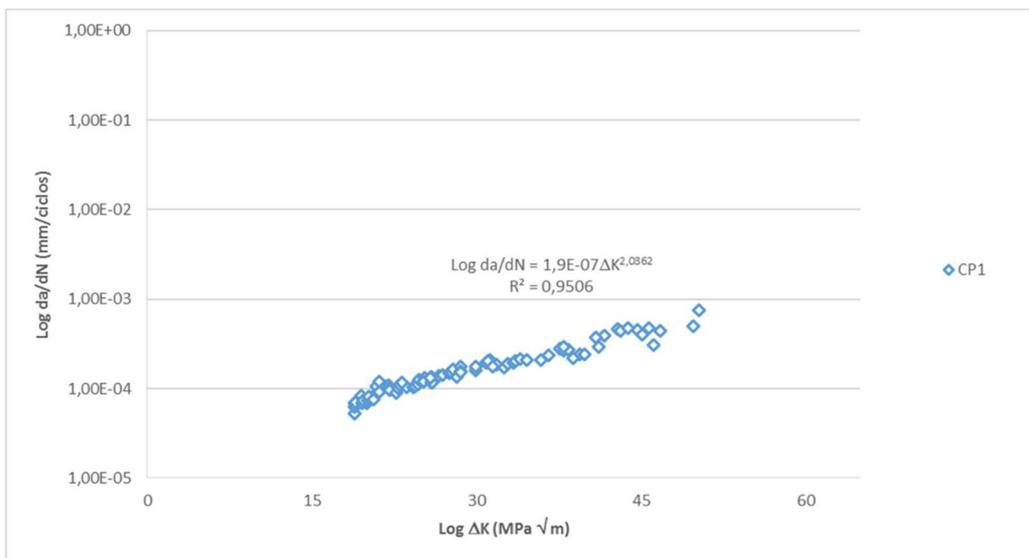


FIGURA 4.11 – Curvas da/dN vs ΔK em escala logarítmica do corpo-de-prova CP1 para $R=0,1$ e Frequência de 30Hz.

$$\text{Log } da/dN = 1,9E - 7\Delta K^{2,0362} \quad (4.5)$$

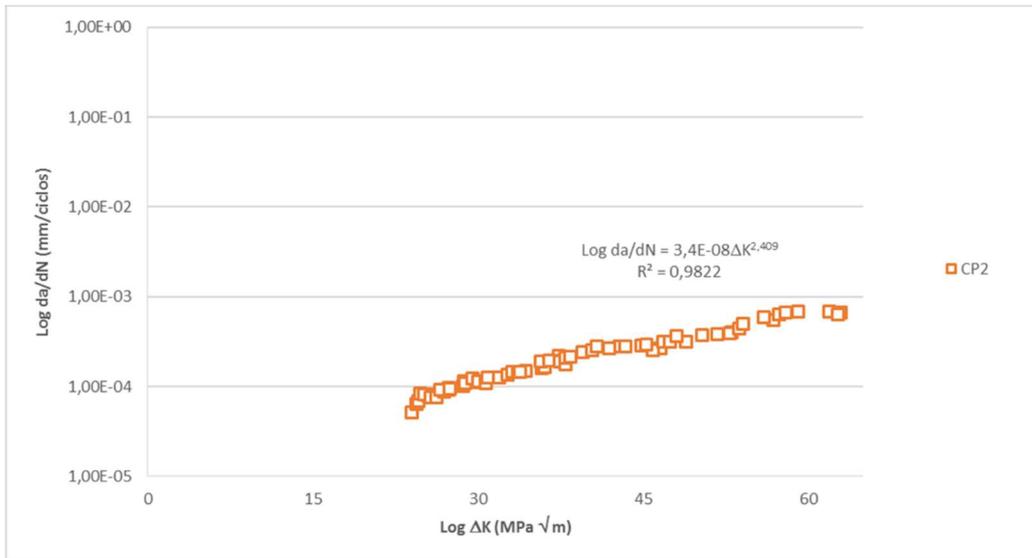


FIGURA 4.12 – Curvas da/dN vs ΔK em escala logarítmica do corpo-de-prova CP2 para R=0,1 e Frequência de 30Hz.

$$\text{Log } da/dN = 3,4E - 8\Delta K^{2,409} \quad (4.6)$$

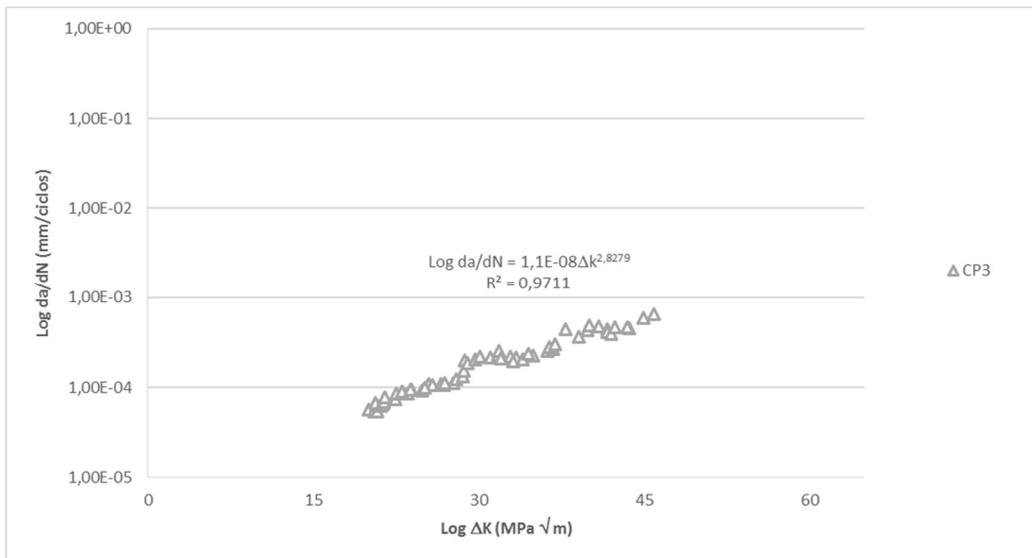


FIGURA 4.13 – Curvas da/dN vs ΔK em escala logarítmica do corpo-de-prova CP3 para R=0,1 e Frequência de 30Hz.

$$\text{Log } da/dN = 1,1E - 8\Delta K^{2,8279} \quad (4.7)$$

A partir desses resultados podem ser obtidos as constantes C e m do material. A tabela 4.2 mostra os valores encontrados para os três corpos de prova com ensaios concluídos.

TABELA 4.2
Coeficientes C e m obtidos para condição de ensaio

ASTM A572 Gr 50			
Equação de Paris: $da/dN = C(\Delta K)^m$			
	CP1	CP2	CP3
C*	$1,9 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$
m	2,04	2,41	2,83

Obs.: * Valores em mm/ciclo.

Embora os resultados dos três corpos de prova apresentem curvas semelhantes, pode-se perceber menor dispersão e melhor tendência dos pontos da curva gerada para o ensaio do CP2.

A diferença do resultado dos parâmetros C e m foi menor entre os corpos de prova CP2 e CP3 do que a diferença entre qualquer um destes com o corpo de prova CP1.

Tais resultados podem ser comparados com os parâmetros C e m de aços estruturais encontrados na literatura, tabela 4.3. Dowling (1999) e Osgood (1982), apresentam valores de referência que podem ser utilizados quando os dados do material de interesse não estão disponíveis.

TABELA 4.3
Coeficientes C e m para aços estruturais obtidos na literatura

Tipo do aço	C*	m
Aço Martensítico	$1,35 \times 10^{-7}$	2,25
Aço Austenítico	$5,59 \times 10^{-9}$	3,25
Aço Ferrítico - perlítico	$6,87 \times 10^{-9}$	3,00

FONTE – DOWLING, 1999; OSGOOD, 1982.

Obs.: * Valores em mm/ciclo.

Pugnoa e colaboradores (2006), em um estudo sobre a lei de Paris, apresentaram os resultados experimentais para a previsão de vida do aço SAE 1045. Os parâmetros C e m encontrados são mostrados na tabela 4.4.

TABELA 4.4
Coeficientes C e m para o aço SAE 1045

Material	C*	m
Aço SAE 1045	$8,1 \times 10^{-9}$	3,5

FONTE – PUGNOA, 2006.

Obs.: * Valores em mm/ciclo.

Segundo Dowling (1999), o parâmetro m da equação de Paris aparece como expoente de ΔK , sendo, portanto, considerado como força motriz da propagação da trinca. Isto significa que o aumento do valor de m favorece o crescimento da trinca, o que diminui a vida do material em fadiga.

O valor médio do parâmetro m obtido para o material estudado é cerca de 23% menor que o valor médio dos aços estruturais Ferrítico – Perlítico citados na literatura.

Apesar das diferenças encontradas, a metodologia é muito importante e tem grande relevância para sua aplicação prática na indústria pois irá reduzir custos e aumentar a confiabilidade da manutenção.

A fim de obter parâmetros mais fidedignos, será necessário realizar mais ensaios a fim de aumentar o banco de dados.

4.6 Comparação dos valores de propagação da trinca vs número de ciclos – Análise pelo ensaio de ultrassom e análise pelo ensaio de laboratório

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de ultrassom realizados na caçamba em serviço e dos resultados obtidos pelos ensaios de fadiga em laboratório foi possível fazer a comparação e análise da diferença dos valores de propagação de trinca.

A tabela 4.5 mostra o resumo dos resultados experimentais obtidos.

TABELA 4.5

Comparativo do crescimento da trinca para os ensaios de ultrassom e de laboratório

Ensaio	Número de ciclos	Crescimento da trinca (mm)
Ultrassom	604.211	42,14
Laboratório (CP1)	128.909	13,70
Laboratório (CP2)	90.541	11,49
Laboratório (CP3)	81.121	10,50

A fim de comparar os resultados obtidos, foi feito o ajuste dos resultados dos ensaios de laboratório com o intuito de simular o número de ciclos necessários para que os corpos de prova tivessem o mesmo valor de propagação de trinca que a caçamba em serviço durante o período de trabalho entre os dois ensaios de ultrassom realizados. Para realizar a simulação foram aplicadas as equações de previsão de vida e de determinação do fator geométrico do corpo de prova tipo CT disponíveis na literatura.

A Eqs. 4.8 e 4.9 foram utilizadas para indicar a função do fator geométrico com a variação da concentração de tensão e determinação do fator geométrico reespectivamente.

$$\Delta K = f(g)\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.8)$$

$$f(g) = 1,12 - 0,231\left(\frac{a}{b}\right) + 10,55\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 21,72\left(\frac{a}{b}\right)^3 + 30,39\left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad (4.9)$$

O valor do fator geométrico foi calculado a partir dos dados dimensionais do corpo de prova, FIG. 3.7. O valor para o fator geométrico encontrado foi $f(g) = 1,90$.

A Eq. 4.10 foi deduzida pelas Eqs. 4.11 e 4.12 e os valores dos parâmetros obtidos nos ensaios foram aplicados gerando assim, os resultados do ensaio de laboratório ajustado na tabela 4.6.

$$\frac{da}{dN} = C(1,90\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m \quad (4.10)$$

$$Nf = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(1,12\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m} \quad (4.11)$$

$$Nf = \frac{2}{(m-2)C(1,12\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} \left(\frac{1}{a_i^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right) \quad (4.12)$$

TABELA 4.6

Comparativo do crescimento da trinca para os ensaios de ultrassom e de laboratório ajustado

Ensaio	Número de ciclos	Crescimento da trinca (mm)
Ultrassom	604.211	42,14
Laboratório Ajustado (CP1)	208.290	42,14
Laboratório Ajustado (CP2)	601.764	42,14
Laboratório Ajustado (CP3)	913.520	42,14

Nota-se boa aproximação do resultado do ensaio de laboratório ajustado do corpo de prova CP2 com o resultado do ensaio de ultrassom, diferença de apenas 0,4%. Este resultado reforça o que foi imencionado anteriormente sobre a melhor tendência e coerência nos pontos dos gráficos Δa vs N e da/dN vs ΔK do CP2.

Embora os resultados do CP1 e CP3 tenham apresentado maior variação, eles não podem ser desconsiderados pois. Existem algumas variáveis de controle durante o ensaio que nem sempre apresentam a mesma exatidão para todos os corpos de prova, como exemplo tamanho da pré trinca.

5 CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida permite aplicar os fundamentos da mecânica da fratura linear elástica, analisar o comportamento estrutural de caçambas de recuperadoras de minério em seu ambiente de serviço e comparar com o comportamento estrutural de corpos de prova em laboratório.

Os resultados obtidos pelos ensaios de laboratório possibilitam uma boa aproximação e ideia da propagação de trincas em fadiga do material. O comportamento do corpo de prova CP2 foi semelhante ao comportamento da caçamba em serviço e é o mais adequado, dentre os 3 CPs, para análise mais detalhada.

Os resultados do ensaio de laboratório ajustado obtidos pela aplicação das equações de previsão de vida apresentaram uma diferença de cerca de 0,4% para o corpo de prova CP2 e 51% para o CP3.

Os resultados do ensaio de laboratório ajustado possibilitam a comparação objetiva e direta entre os dois modelos de experimentos utilizados neste trabalho.

De maneira geral, a análise da propagação de trincas em fadiga tem fundamental importância para a manutenção industrial, já que os dados e resultados podem servir de referência para o planejamento de manutenções preventivas e para o planejamento estratégico das aquisições de componentes e serviços.

Como os resultados permitem a realização de boas previsões para a vida de um componente, a realização de mais ensaios em outros corpos de prova contribuem para aumentar ainda mais a confiabilidade dos resultados.

A previsão de vida realizada neste trabalho suportam na decisão e determinação de prazos confiáveis para a manutenção nos equipamentos em uso. Permite o desenvolvimento de novos trabalhos como a pesquisa e seleção de materiais que tenham propriedades adequadas de fadiga para componentes semelhantes ao estudado. Esta seleção deve ser baseada principalmente no expoente m da curva da/dN .

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar estudo para estabelecer o valor de tenacidade à fratura (K_{IC}) do material e com o intuito de aumentar a confiabilidade dos resultados, realizar os ensaios em uma gama maior de corpos de prova para determinação dos parâmetros C e m de maneira estatística.
2. Realizar estudo para propor melhoria no projeto da caçamba das recuperadoras de minério com alterações do perfil geométrico e dimensional da região de maior probabilidade de propagação de trincas por fadiga.
3. Realizar estudo de seleção de material mais adequado para aplicação em caçambas de recuperadoras de minério.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI – Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 2013.
www.abendi.org.br.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM E647-08e1.
Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, Annual Book of
ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6002. **Determinação de
descontinuidades em chapas de aço por ultrassom**, 2015.

ANDREUCCI, R. **Ensaio não Destrutivo por Ultrassom**. Ed. Jan/2011.

ANDREUCCI, R. **Partículas Magnéticas**. Ed. Out/2014.

ASTM, E 1823-96. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture testing**, 1996.

BANNANTINE, J. A.; COMER, J.; HANDROCK, J. **Fundamentals of Fatigue Analysis**, pp.
88 - 114, 1989

BASTOS, F.V.M. **Frenagem Controlada em Transportadores Regenerativos**. Monografia
Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco, Itatiba, SP.

BOSNJAK, S.M.; ARSIC, M.A.; ZRNIC, N.D. **Bucket Wheel Excavator: Integrity
Assessment of The Bucket Whell Boom Tie-Rod Welded Joint**. Enginnering Failure
Analysis Jornal 18, 2011, p. 212-222.

BOSNJAK, S.M.; PETKOVIC, Z.D.; ATANASOVSKA, I.D.; MILOJEVIC G.Z.;
MIHAJLOVIC V.M. **Bucket Chain Excavator: Failure Analysis and Redesign of The
Counterweigh Boom Supporting Truss Columns**. Enginnering Failure Analysis Jornal 32,
2013, p. 322-333.

BOSNJAK, S.M.; PETKOVIC, Z.D.; SIMONOVIC, A.M. **Designing-in Failure and Redesign of Bucket Wheel Excavator Undercarriage**. Engineering Failure Analysis Journal 35, 2013, p. 95-103.

CALLISTER, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**, 7.ed. York, PA: GTS, p. 227 - 237 , 2007.

CARRISSO, C.R.; CORREIRA, G.J. **Classificação e Peneiramento: Comunicação Técnica elaborada para a 4º Edição do Livro de Tratamento de Minérios** p.197-238, Dez, 2004.

DA COSTA, G.F. **A Importância da inspeção visual no controle dos processos de fabricação e montagem das estruturas**, Portal Metálica, 2017.

DA LUZ, B.A.; SAMPAIO A.J.; DE ALMEIDA M.L.S. **Tratamento de Minérios**, CETEM-MCT, Rio de Janeiro, 2004.

DA ROSA, E. **Análise da Resistência Mecânica, Mecânica da Fratura e Fadiga**, Out, 2002.

DAS, S.K.; SIVAPRASAD, S; CHATTERJEE, S.; TARAFDER, S. **The effect of variation of microstructure on fracture mechanics parameters** of HSLA-100 steel, Material Science & Engineering A, v.431, issues 1-2, p.68-79, 2006.

DOWLING, N.E. **Mechanical behavior of materials – Engineering methods for deformation, fracture and fatigue**, 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 830p, 1999.

FILHO, F.C.A.; CAMARGO, R.J.; GRANDINETTI, J.F. **Application of Ultrasonic Nondestructive Testing in the Aeronautical Industry**, Taubaté, 2014.

FUCHS, H. O.; STEPHENS, R. I. **Metal Fatigue in Engineering**, ed. A Wiley, New York, 1980.

GENTIL, V. **Corrosão**, LTC, Rio de Janeiro, 1982.

GHOSAL, S.; MISRA D.; SAHA T.K. **Failure Analysis of Stacker-cum-Reclaimer in Ore Handling Plant**, Journal of Failure Analysis and Prevention, v.8, issue 6, p.564-571, 2008.

GUOSHENG, F.; SUMEI, J.; NING, L. **Push Rod Failure Analysis of a mining heavy dump truck**, Engineering Failure Analysis Journal 25, 2012, p. 193-199.

HER, S.C.; LIN, S.T. **Non-Destructive Evaluation of Depth of Surface Cracks Using Ultrasonic Frequency Analysis**, Journal List Sensors, v.14, 2014.

HUBER, A.E.; OKA, W.; ISOLD, F. **Moagem: Conceitos e Dimensionamento**, Metso, 2013.

LEE, Y.; PAN J.; HATHAWAY R.; BARKEY M. **Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice)**, USA, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 5049-1. **Mobile equipment for continuous handling of bulk materials**, Ed. 2, 1994.

MACHADO, J. M. **Planejamento Baseado em Risco de Inspeção à Fadiga em Unidades Estacionárias de Produção**, Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

MEGGIOLARO, M. A.; DE CASTRO, J. T. P. **Comparing Overload-Induced Retardation Models on Fatigue Crack Propagation**, 56º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 16 – 19 Julho, 2001.

MEGGIOLARO, M. A.; DE CASTRO, J. T. P. **Vida 96 – Danômetro Visual para Automatizar o Projeto à Fadiga Sob Carregamentos Complexos**, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC, Rio de Janeiro.

METSO, **Bulk Material Handling - Feeders Manual**, 2002.

METSO, **Britadores e Rebritadores de Mandíbulas de 1 eixo: Conceitos e Manutenção**, 2013.

METSO, **Equipamentos vibratórios Construction & mining**, 2009.

METSO, **Manual de Britagem, modos de falha e manutenção**. 2013.

METSO, **Manual de Moagem, modos de falha e manutenção**, 2013.

METSO, **Mining Screens: Instructions Manual**, 2013.

NORTON, R.L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**, p. 293-387, 2006.

OSGOOD, C.C. **Fatigue design**, 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1982, 606p

PARIS, P.C.; ERDOGAN, F. **A Critical Analysis of Crack Propagation Laws**, Journal of Basic Engineering, v.85, p. 528-534, 1963.

PUGNOA, N.; CIAVARELLAB, M.; CORNETTIA, P. and CARPINTERIA, A. **A generalized Paris' law for fatigue crack growth**. Journal of Mechanics and Physics of Solids v.54, p. 1333-1349, 2006.

RESENDE, O.J.E.; CRUZ, S.G.J.; MELO, C.J. **Ensaio Não Destrutivo Por Ultrassom XV INIC / XI EPG – UNIVAP 2011**.

RICHARDS, C.E.; LIDLEY, T.C. **The influence of stress intensity and microstructure on fatigue crack propagation in ferrite materials**. Engineering Fracture Mechanics, v.4, issue 4, p. 951-978, 1972.

SERRA, J.A.; FILHO, P.S.J. **Utilização da Técnica de Emissão Acústica na Adequação à NR-13 de Vasos de Pressão**, Encontro técnico do GLP, 2012.

SHILPA, S. **Safety Features for Reduction of Failure in Stacker cum Reclaimer for Thermal Power Plant**. International Journal of Science and Research (IJSR), v. 2, Issue 9, 2013, Paper ID: 11091303.

SINHA, R.S.; MUKHOPADHYAY, A.K. **Analysis of Failure Statistics for cone Crusher Maintenance Vis-a-Vis Operational Reliability Assessment**, International Journal of

Mechanical and Production Engineering Research and Development, v.3, issue 8, p.126-132, 2013.

SINHA R. S.; MUKHOPADHYAY A. **Reliability centered maintenance of cone crusher: a case study**, International Journal of System Assurance Engineering and Management, March 2015, v.6, issue 1, p. 32-35.

STROHAECKER, T.R. **Mecânica da Fratura Aplicada à Area da Fadiga**. Caderno Técnico Metalurgia e Materiais, 2005.

VALE, **Fratura do cubo da roda de recuperadora de minério RC2072VG01 – Análise de falha**, 2015.

VALE, **Manual de Processo Mineral**, 2011.

ZHENG, S.; CHENG K.; WANG J. **Failure analysis of frame crack on a wide-body mining dump truck**, Engineering Failure Analysis Journal, p. 153-165, 2015.

ZENHA, F. **Bulk Material Handling: Máquinas de Pátio**, Metso, 2012.

ZERBST, U.; KLINGER C.; CLEGG, C. **Fracture mechanics as a tool in failure analysis - Prospects and limitations**. Engineering Failure Analysis Journal, 55, p. 376-410, 2015.

ZOLIN, I. **Ensaio Mecânicos e Análise de Falhas**, p. 15-32, 2011.

A.2 Relatório do 2º END – Ultrassom realizado na caçamba objeto de estudo

RELATÓRIO DE ENSAIO																																																																												
ULTRASSOM																																																																												
PROCEDIMENTO - N° REV. PR 011 REV. II (OUT/2004)				CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO ITEM 16 PG 20				RELATÓRIO N° 201709523685																																																																				
MATERIAL AÇO CARBONO		N° C.P. CAÇAMBA N° 03		CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE ESCOVADA			FOLHA 01 DE 01																																																																					
NORMA DE REFERÊNCIA ASME SEC. V AD. 2002																																																																												
APARELHO A-SCAN		FABRICANTE SONATEST			MODELO MASTERSCAM 700M			N° DE SÉRIE 00500243-69																																																																				
CABEÇOTE							DADOS DE CALIBRAÇÃO																																																																					
TIPO	FABRICANTE	MODELO	N° DE SÉRIE	DIMENSÕES (mm)	ANG. REAL	FREQ. (MHz)	ESPESSURA DA PEÇA (mm)	ESPESSURA DO BLOCO (mm)	GP	PT	GV																																																																	
Duplo-Cristal	PANAMETRICS	DL4R	66134	10	0	4	13	6			53,9																																																																	
Normal	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXX																																																																	
Angular	SONATEST	SMA4-60ZR	2228	8 X 9	60	4	13	20	49	9,4	58,4																																																																	
Angular	SONATEST	SMA4-70ZR	2252	8 X 9	70	4	13	20	47	8,3	47																																																																	
Angular	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXX																																																																	
Croqui - Superfície de varredura																																																																												
							<table border="1"> <thead> <tr> <th>ANG. POS.</th> <th>SE</th> <th>N</th> <th>45°</th> <th>60°</th> <th>70°</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>X</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>X</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>X</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				ANG. POS.	SE	N	45°	60°	70°	1	X					2				X		3					X																																										
ANG. POS.	SE	N	45°	60°	70°																																																																							
1	X																																																																											
2				X																																																																								
3					X																																																																							
DESCONTINUIDADES																																																																												
TESTE	CABEÇOTE	AMP. (dB)	LOCAL (mm)	COMPRIMENT O (mm)	PROFUND. (mm)	PERCURSO SOM (mm)	DISTÂNCIA REFERÊNCIA (mm)	SUPERF. DETECÇÃO	IDENTIFICAÇÃO DESCONTINUID ADE	LAUDO																																																																		
2	70	(+) 4,8	65	59,94	6,37	59,94	140,06	A		R																																																																		
XXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX																																																																		
XXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX																																																																		
XXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX																																																																		
XXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX																																																																		
LEGENDA: Laudo: GP - Ganho Primário A: Aprovado PT - Perda por Transferência R: Reprovado GV - Ganho de Varredura NEC: Necessário Exame Complementar							OBSERVAÇÕES: A inspeção foi realizada em uma face da caçamba devido a grande quantidade de material incrustado nas demais faces																																																																					
<input type="checkbox"/> APROVADO							<input checked="" type="checkbox"/> REPROVADO		<input type="checkbox"/> NEC																																																																			
NOME DO INSPECTOR: HELTON COSTA							MATRÍCULA: 01842401																																																																					
MODALIDADE DO EXAME: US-N2-S2					ASSINATURA DO INSPECTOR:																																																																							
EMPRESA: VALE S.A COMPLEXO VARGEM GRANDE - TERMINAL FERROVIÁRIO DE ANDAIME				DATA: 15/09/2017			VISTO DO ENGENHEIRO RESPONSÁVEL: WARLEY MOREIRA																																																																					

ANEXO B

B.1 Relatório de Apontamento de horas trabalhadas da recuperadora de minério

Trecho do relatório de apontamento de tempo gerado pelo sistema de gestão de produtividade integrado com a recuperadora de minério em que foi selecionada a caçamba para estudo. O relatório indica o número de horas trabalhadas durante o intervalo de tempo entre os dois ensaios de ultrassom. O resultado do número de horas trabalhadas foi utilizado para cálculo do número de ciclos da caçamba em serviço sob condições de fadiga.

Apontamento de Tempo							
15/9/2017 13:49:36							
UO Gestão:		VGR					
Período:		15/05/2017 à 15/09/2017					
(X) Industrial		() Móveis					
Equipamento/Sistema:		BUCK_VGR_RC-2072VG02					
768,01							
UO Pro	Início	Fim	Duração	Evento de tempo	Eqpto Industrial	Justificativa	
VGR	26/5/2017 01:00:00	01:16:00	0,27	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 04:45:00	05:21:00	0,60	002-OPERANDO C/ BAIXA PRODUTIVIDADE	RC_2072VG_02	Operando reduzido devido material úmido.	
VGR	27/5/2017 05:45:00	07:00:00	1,25	002-OPERANDO C/ BAIXA PRODUTIVIDADE	RC_2072VG_02	Operando reduzido devido SinterFeed úmido	
VGR	27/5/2017 07:00:00	07:26:00	0,43	002-OPERANDO C/ BAIXA PRODUTIVIDADE	RC_2072VG_02	Operando reduzido devido SinterFeed úmido	
VGR	27/5/2017 07:50:00	08:40:00	0,83	002-OPERANDO C/ BAIXA PRODUTIVIDADE	RC_2072VG_02	Operando reduzido devido SinterFeed úmido	
VGR	27/5/2017 08:55:00	08:59:00	0,07	001-OPERANDO			
TFA	27/5/2017 08:59:00	09:20:00	0,35	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 09:20:00	09:50:00	0,50	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 10:00:00	10:40:00	0,67	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 10:50:00	11:40:00	0,83	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 11:55:00	13:38:00	1,72	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 14:05:00	14:10:00	0,08	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 14:15:00	15:10:00	0,92	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 15:28:00	16:00:00	0,53	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 16:00:00	17:50:00	1,83	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 18:05:00	18:33:00	0,47	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 18:37:00	20:10:00	1,55	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 20:30:00	22:20:00	1,83	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 22:20:00	22:46:00	0,43	001-OPERANDO			
VGR	27/5/2017 23:15:00	00:35:00	1,33	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 00:39:00	01:00:00	0,35	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 01:00:00	01:45:00	0,75	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 01:55:00	03:10:00	1,25	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 03:25:00	03:30:00	0,08	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 03:30:00	04:20:00	0,83	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 04:20:00	04:25:00	0,08	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 04:25:00	05:38:00	1,22	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 05:45:00	07:00:00	1,25	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 07:00:00	07:45:00	0,75	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 07:45:00	08:00:00	0,25	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 08:00:00	10:40:00	2,67	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 10:50:00	11:00:00	0,17	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 11:10:00	11:28:00	0,30	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 11:41:00	13:13:00	1,53	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 13:20:00	13:30:00	0,17	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 14:05:00	15:00:00	0,92	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 15:25:00	16:00:00	0,58	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 16:00:00	16:33:00	0,55	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 16:40:00	20:00:00	3,33	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 20:17:00	20:45:00	0,47	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 21:30:00	23:09:00	1,65	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 23:09:00	23:35:00	0,43	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 23:35:00	23:50:00	0,25	001-OPERANDO			
VGR	28/5/2017 23:55:00	00:00:00	0,08	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 00:31:00	01:00:00	0,48	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 01:00:00	01:11:00	0,18	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 01:11:00	02:05:00	0,90	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 02:10:00	03:50:00	1,67	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 04:15:00	04:35:00	0,33	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 05:30:00	06:15:00	0,75	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 06:49:00	07:00:00	0,18	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 07:00:00	07:50:00	0,83	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 08:04:00	09:50:00	1,77	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 10:05:00	11:20:00	1,25	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 11:25:00	11:35:00	0,17	001-OPERANDO			
VGR	29/5/2017 11:45:00	11:57:00	0,20	001-OPERANDO			

ANEXO C

C.1 Planilhas com os resultados gerados, para os três corpos de prova ensaiados, pelo software de aquisição de dados da máquina de ensaio universal INSTRON 8802.

Delta-K MPa-m ^{1.5} VS da/dN mm/cyc						N ciclos VS da/dN mm/cyc					
CP1		CP2		CP3		CP1		CP2		CP3	
1,73E+01	7,18E-05			1,96E+01	3,85E-05	1,00E+00	7,18E-05	4,33E+04	2,87E-05	2,16E+04	3,85E-05
1,71E+01	4,79E-05	2,14E+01	2,87E-05	1,98E+01	4,87E-05	2,80E+01	4,79E-05	5,02E+04	3,20E-05	2,57E+04	4,87E-05
1,75E+01	3,00E-05	2,17E+01	3,20E-05	2,00E+01	5,67E-05	8,30E+01	3,00E-05	5,13E+04	3,49E-05	2,84E+04	5,67E-05
1,73E+01	3,47E-05	2,16E+01	3,49E-05	2,06E+01	5,42E-05	1,91E+02	3,47E-05	5,89E+04	3,81E-05	3,35E+04	5,42E-05
1,72E+01	3,25E-05	2,18E+01	3,81E-05	2,05E+01	5,59E-05	2,18E+02	3,25E-05	6,32E+04	4,45E-05	3,48E+04	5,59E-05
1,75E+01	3,49E-05	2,23E+01	4,45E-05	2,08E+01	5,44E-05	5,45E+02	3,49E-05	6,39E+04	4,95E-05	3,64E+04	5,44E-05
1,76E+01	3,70E-05	2,23E+01	4,95E-05	2,07E+01	6,33E-05	3,51E+03	3,70E-05	6,87E+04	5,82E-05	4,09E+04	6,33E-05
1,80E+01	3,13E-05	2,31E+01	5,82E-05	2,06E+01	6,78E-05	5,37E+03	3,13E-05	7,00E+04	5,82E-05	4,18E+04	6,78E-05
1,78E+01	3,88E-05	2,30E+01	5,82E-05	2,11E+01	6,29E-05	1,34E+04	3,88E-05	7,10E+04	5,50E-05	4,36E+04	6,29E-05
1,81E+01	4,14E-05	2,30E+01	5,50E-05	2,13E+01	7,33E-05	1,79E+04	4,14E-05	7,43E+04	6,05E-05	4,50E+04	7,33E-05
1,87E+01	4,53E-05	2,37E+01	6,05E-05	2,13E+01	6,59E-05	2,11E+04	4,53E-05	7,71E+04	5,07E-05	4,64E+04	6,59E-05
1,81E+01	4,91E-05	2,38E+01	5,07E-05	2,13E+01	6,87E-05	2,80E+04	4,91E-05	7,97E+04	5,11E-05	4,91E+04	6,87E-05
1,89E+01	5,24E-05	2,40E+01	5,11E-05	2,15E+01	7,71E-05	2,83E+04	5,24E-05	8,28E+04	6,38E-05	5,12E+04	7,71E-05
1,89E+01	6,29E-05	2,44E+01	6,38E-05	2,24E+01	7,48E-05	3,92E+04	6,29E-05	8,45E+04	6,80E-05	5,23E+04	7,48E-05
1,89E+01	6,81E-05	2,45E+01	6,80E-05	2,25E+01	8,52E-05	4,36E+04	6,81E-05	8,59E+04	8,23E-05	5,36E+04	8,52E-05
1,90E+01	7,10E-05	2,56E+01	8,23E-05	2,31E+01	8,67E-05	4,66E+04	7,10E-05	8,72E+04	8,31E-05	5,62E+04	8,67E-05
1,95E+01	8,31E-05	2,48E+01	8,31E-05	2,36E+01	8,53E-05	5,09E+04	8,31E-05	8,95E+04	7,88E-05	5,93E+04	8,53E-05
2,00E+01	6,90E-05	2,54E+01	7,88E-05	2,30E+01	9,05E-05	5,26E+04	6,90E-05	8,98E+04	8,12E-05	6,05E+04	9,05E-05
1,96E+01	6,82E-05	2,51E+01	8,12E-05	2,39E+01	9,30E-05	5,70E+04	6,82E-05	9,26E+04	7,86E-05	6,33E+04	9,30E-05
1,97E+01	7,37E-05	2,58E+01	7,86E-05	2,38E+01	9,42E-05	6,07E+04	7,37E-05	9,41E+04	7,60E-05	6,51E+04	9,42E-05
2,01E+01	7,40E-05	2,57E+01	7,60E-05	2,49E+01	9,21E-05	6,15E+04	7,40E-05	9,52E+04	7,60E-05	6,68E+04	9,21E-05
2,02E+01	7,55E-05	2,62E+01	7,60E-05	2,54E+01	1,10E-04	6,32E+04	7,55E-05	9,72E+04	8,83E-05	6,97E+04	1,10E-04
2,02E+01	8,07E-05	2,69E+01	8,83E-05	2,57E+01	1,06E-04	6,38E+04	8,07E-05	9,94E+04	9,61E-05	7,16E+04	1,06E-04
2,06E+01	7,61E-05	2,73E+01	9,61E-05	2,51E+01	9,81E-05	6,64E+04	7,61E-05	1,00E+05	9,22E-05	7,28E+04	9,81E-05
2,10E+01	9,18E-05	2,74E+01	9,22E-05	2,66E+01	1,08E-04	6,82E+04	9,18E-05	1,01E+05	9,23E-05	7,42E+04	1,08E-04
2,09E+01	1,06E-04	2,65E+01	9,23E-05	2,68E+01	1,05E-04	7,14E+04	1,06E-04	1,03E+05	1,00E-04	7,69E+04	1,05E-04
2,11E+01	9,09E-05	2,74E+01	1,00E-04	2,76E+01	1,13E-04	7,14E+04	9,09E-05	1,05E+05	9,38E-05	7,91E+04	1,13E-04
2,12E+01	1,19E-04	2,87E+01	9,38E-05	2,69E+01	1,12E-04	7,39E+04	1,19E-04	1,07E+05	1,14E-04	7,98E+04	1,12E-04
2,17E+01	1,07E-04	2,88E+01	1,14E-04	2,80E+01	1,23E-04	7,55E+04	1,07E-04	1,07E+05	1,11E-04	8,02E+04	1,23E-04
2,20E+01	1,09E-04	2,90E+01	1,11E-04	2,86E+01	1,32E-04	7,71E+04	1,09E-04	1,09E+05	1,08E-04	8,27E+04	1,32E-04
2,21E+01	1,01E-04	2,88E+01	1,08E-04	2,86E+01	1,54E-04	8,02E+04	1,01E-04	1,09E+05	1,24E-04	8,43E+04	1,54E-04
2,20E+01	9,60E-05	2,95E+01	1,24E-04	2,87E+01	1,97E-04	8,14E+04	9,60E-05	1,11E+05	1,12E-04	8,52E+04	1,97E-04
2,30E+01	1,09E-04	3,01E+01	1,12E-04	2,90E+01	1,83E-04	8,21E+04	1,09E-04	1,13E+05	1,15E-04	8,61E+04	1,83E-04
2,27E+01	8,98E-05	3,00E+01	1,15E-04	2,96E+01	2,04E-04	8,30E+04	8,98E-05	1,14E+05	1,09E-04	8,64E+04	2,04E-04
2,29E+01	1,01E-04	3,07E+01	1,09E-04	3,01E+01	2,22E-04	8,47E+04	1,01E-04	1,15E+05	1,24E-04	8,69E+04	2,22E-04
2,30E+01	1,09E-04	3,19E+01	1,24E-04	3,11E+01	2,14E-04	8,76E+04	1,09E-04	1,17E+05	1,25E-04	8,85E+04	2,14E-04
2,36E+01	1,05E-04	3,09E+01	1,25E-04	3,17E+01	2,30E-04	8,80E+04	1,05E-04	1,18E+05	1,35E-04	8,93E+04	2,30E-04
2,32E+01	1,17E-04	3,27E+01	1,35E-04	3,19E+01	2,53E-04	8,97E+04	1,17E-04	1,19E+05	1,44E-04	9,02E+04	2,53E-04
2,43E+01	1,04E-04	3,31E+01	1,44E-04	3,28E+01	2,18E-04	9,03E+04	1,04E-04	1,20E+05	1,47E-04	9,08E+04	2,18E-04
2,44E+01	1,06E-04	3,37E+01	1,47E-04	3,20E+01	2,11E-04	9,27E+04	1,06E-04	1,21E+05	1,48E-04	9,10E+04	2,11E-04
2,46E+01	1,12E-04	3,44E+01	1,48E-04	3,34E+01	2,15E-04	9,49E+04	1,12E-04	1,22E+05	1,45E-04	9,17E+04	2,15E-04
2,47E+01	1,26E-04	3,38E+01	1,45E-04	3,31E+01	1,93E-04	9,62E+04	1,26E-04	1,24E+05	1,61E-04	9,27E+04	1,93E-04
2,53E+01	1,28E-04	3,58E+01	1,61E-04	3,40E+01	2,06E-04	9,68E+04	1,28E-04	1,24E+05	1,63E-04	9,33E+04	2,06E-04
2,53E+01	1,31E-04	3,60E+01	1,63E-04	3,49E+01	2,23E-04	9,79E+04	1,31E-04	1,25E+05	1,88E-04	9,44E+04	2,23E-04
2,52E+01	1,19E-04	3,57E+01	1,88E-04	3,45E+01	2,35E-04	9,99E+04	1,19E-04	1,26E+05	2,17E-04	9,45E+04	2,35E-04
2,59E+01	1,16E-04	3,74E+01	2,17E-04	3,62E+01	2,50E-04	1,02E+05	1,16E-04	1,27E+05	1,93E-04	9,55E+04	2,50E-04
2,59E+01	1,17E-04	3,77E+01	1,93E-04	3,67E+01	2,65E-04	1,04E+05	1,17E-04	1,27E+05	1,94E-04	9,63E+04	2,65E-04
2,59E+01	1,36E-04	3,64E+01	1,94E-04	3,63E+01	2,79E-04	1,04E+05	1,36E-04	1,27E+05	1,88E-04	9,68E+04	2,79E-04
2,66E+01	1,37E-04	3,74E+01	1,88E-04	3,69E+01	2,98E-04	1,05E+05	1,37E-04	1,28E+05	1,75E-04	9,72E+04	2,98E-04
2,58E+01	1,33E-04	3,79E+01	1,75E-04	3,91E+01	3,62E-04	1,06E+05	1,33E-04	1,29E+05	2,11E-04	9,78E+04	3,62E-04
2,69E+01	1,41E-04	3,80E+01	2,11E-04	3,98E+01	4,30E-04	1,07E+05	1,41E-04	1,29E+05	2,15E-04	9,83E+04	4,30E-04
2,75E+01	1,48E-04	3,84E+01	2,15E-04	3,79E+01	4,38E-04	1,09E+05	1,48E-04	1,30E+05	2,40E-04	9,86E+04	4,38E-04

2,76E+01	1,51E-04	3,95E+01	2,40E-04	4,09E+01	4,80E-04		1,09E+05	1,51E-04	1,31E+05	2,56E-04	9,89E+04	4,80E-04
2,82E+01	1,36E-04	4,03E+01	2,56E-04	4,00E+01	4,92E-04		1,10E+05	1,36E-04	1,32E+05	2,79E-04	9,91E+04	4,92E-04
2,79E+01	1,64E-04	4,08E+01	2,79E-04	4,17E+01	4,42E-04		1,11E+05	1,64E-04	1,32E+05	2,80E-04	9,95E+04	4,42E-04
2,85E+01	1,76E-04	4,28E+01	2,80E-04	4,16E+01	4,15E-04		1,12E+05	1,76E-04	1,33E+05	2,68E-04	9,97E+04	4,15E-04
2,85E+01	1,56E-04	4,19E+01	2,68E-04	4,20E+01	3,89E-04		1,13E+05	1,56E-04	1,33E+05	2,80E-04	1,00E+05	3,89E-04
2,85E+01	1,54E-04	4,34E+01	2,80E-04	4,23E+01	4,62E-04		1,15E+05	1,54E-04	1,34E+05	2,85E-04	1,01E+05	4,62E-04
2,99E+01	1,62E-04	4,48E+01	2,85E-04	4,37E+01	4,56E-04		1,15E+05	1,62E-04	1,34E+05	2,63E-04	1,01E+05	4,56E-04
2,99E+01	1,78E-04	4,65E+01	2,63E-04	4,34E+01	4,69E-04		1,16E+05	1,78E-04	1,34E+05	2,53E-04	1,01E+05	4,69E-04
3,09E+01	1,94E-04	4,59E+01	2,53E-04	4,49E+01	5,85E-04		1,17E+05	1,94E-04	1,35E+05	2,96E-04	1,02E+05	5,85E-04
3,18E+01	1,86E-04	4,53E+01	2,96E-04	4,58E+01	6,51E-04		1,17E+05	1,86E-04	1,36E+05	3,19E-04	1,02E+05	6,51E-04
3,12E+01	2,08E-04	4,68E+01	3,19E-04				1,19E+05	2,08E-04	1,36E+05	3,17E-04	1,02E+05	
3,11E+01	2,04E-04	4,74E+01	3,17E-04				1,19E+05	2,04E-04	1,36E+05	3,18E-04	1,02E+05	
3,15E+01	1,78E-04	4,88E+01	3,18E-04				1,20E+05	1,78E-04	1,37E+05	3,67E-04	1,03E+05	
3,25E+01	1,72E-04	4,80E+01	3,67E-04				1,21E+05	1,72E-04	1,37E+05	3,83E-04		
3,28E+01	1,90E-04	5,17E+01	3,83E-04				1,22E+05	1,90E-04	1,38E+05	3,75E-04		
3,34E+01	1,93E-04	5,04E+01	3,75E-04				1,23E+05	1,93E-04	1,38E+05	4,01E-04		
3,35E+01	2,04E-04	5,30E+01	4,01E-04				1,23E+05	2,04E-04	1,39E+05	3,91E-04		
3,40E+01	2,14E-04	5,28E+01	3,91E-04				1,24E+05	2,14E-04	1,39E+05	4,37E-04		
3,59E+01	2,10E-04	5,37E+01	4,37E-04				1,25E+05	2,10E-04	1,39E+05	4,99E-04		
3,46E+01	2,07E-04	5,40E+01	4,99E-04				1,26E+05	2,07E-04	1,40E+05	5,51E-04		
3,65E+01	2,35E-04	5,68E+01	5,51E-04				1,27E+05	2,35E-04	1,40E+05	5,86E-04		
3,76E+01	2,78E-04	5,60E+01	5,86E-04				1,28E+05	2,78E-04	1,40E+05	6,38E-04		
3,79E+01	2,67E-04	5,73E+01	6,38E-04				1,28E+05	2,67E-04	1,40E+05	6,62E-04		
3,84E+01	2,74E-04	5,79E+01	6,62E-04				1,29E+05	2,74E-04	1,41E+05	6,85E-04		
3,79E+01	2,95E-04	5,91E+01	6,85E-04				1,30E+05	2,95E-04	1,41E+05	6,64E-04		
3,94E+01	2,40E-04	6,30E+01	6,64E-04				1,31E+05	2,40E-04	1,41E+05	6,82E-04		
3,88E+01	2,21E-04	6,19E+01	6,82E-04				1,32E+05	2,21E-04	1,41E+05	6,40E-04		
3,99E+01	2,44E-04	6,27E+01	6,40E-04				1,33E+05	2,44E-04	1,42E+05			
4,12E+01	2,93E-04						1,33E+05	2,93E-04	1,42E+05			
4,17E+01	3,94E-04						1,34E+05	3,94E-04	1,42E+05			
4,09E+01	3,75E-04						1,34E+05	3,75E-04	1,42E+05			
4,28E+01	4,67E-04						1,35E+05	4,67E-04	1,42E+05			
4,31E+01	4,45E-04						1,36E+05	4,45E-04	1,42E+05			
4,47E+01	4,52E-04						1,36E+05	4,52E-04				
4,38E+01	4,78E-04						1,37E+05	4,78E-04				
4,57E+01	4,79E-04						1,38E+05	4,79E-04				
4,67E+01	4,44E-04						1,38E+05	4,44E-04				
4,51E+01	4,02E-04						1,38E+05	4,02E-04				
4,62E+01	3,05E-04						1,39E+05	3,05E-04				
4,98E+01	4,95E-04						1,39E+05	4,95E-04				
5,03E+01	7,60E-04						1,39E+05	7,60E-04				

N ciclos VS tamanho da trinca						N ciclos VS delta K					
CP1		CP2		CP3		CP1		CP2		CP3	
1,00E+00	2,04E+01	1,00E+00	2,53E+01	1,00E+00	2,48E+01	1,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	0,00E+00
2,80E+01	2,05E+01	3,00E+01	2,57E+01	3,00E+01	2,47E+01	2,80E+01	0,00E+00	3,00E+01	0,00E+00	3,00E+01	0,00E+00
8,30E+01	2,07E+01	8,19E+02	2,58E+01	1,39E+02	2,50E+01	8,30E+01	0,00E+00	8,19E+02	0,00E+00	1,39E+02	0,00E+00
1,91E+02	2,08E+01	4,33E+04	2,60E+01	2,16E+04	2,51E+01	1,91E+02	1,08E+01	4,33E+04	2,14E+01	2,16E+04	1,96E+01
2,18E+02	2,09E+01	5,02E+04	2,62E+01	2,57E+04	2,53E+01	2,18E+02	1,14E+01	5,02E+04	2,17E+01	2,57E+04	1,98E+01
5,45E+02	2,10E+01	5,13E+04	2,64E+01	2,84E+04	2,55E+01	5,45E+02	1,45E+01	5,13E+04	2,16E+01	2,84E+04	2,00E+01
3,51E+03	2,12E+01	5,89E+04	2,66E+01	3,35E+04	2,57E+01	3,51E+03	1,73E+01	5,89E+04	2,18E+01	3,35E+04	2,06E+01
5,37E+03	2,14E+01	6,32E+04	2,67E+01	3,48E+04	2,59E+01	5,37E+03	1,71E+01	6,32E+04	2,23E+01	3,48E+04	2,05E+01
1,34E+04	2,15E+01	6,39E+04	2,69E+01	3,64E+04	2,60E+01	1,34E+04	1,75E+01	6,39E+04	2,23E+01	3,64E+04	2,08E+01
1,79E+04	2,16E+01	6,87E+04	2,70E+01	4,09E+04	2,61E+01	1,79E+04	1,73E+01	6,87E+04	2,31E+01	4,09E+04	2,07E+01
2,11E+04	2,18E+01	7,00E+04	2,72E+01	4,18E+04	2,63E+01	2,11E+04	1,72E+01	7,00E+04	2,30E+01	4,18E+04	2,06E+01
2,80E+04	2,19E+01	7,10E+04	2,73E+01	4,36E+04	2,64E+01	2,80E+04	1,75E+01	7,10E+04	2,30E+01	4,36E+04	2,11E+01
2,83E+04	2,22E+01	7,43E+04	2,74E+01	4,50E+04	2,65E+01	2,83E+04	1,76E+01	7,43E+04	2,37E+01	4,50E+04	2,13E+01
3,92E+04	2,24E+01	7,71E+04	2,76E+01	4,64E+04	2,66E+01	3,92E+04	1,80E+01	7,71E+04	2,38E+01	4,64E+04	2,13E+01
4,36E+04	2,25E+01	7,97E+04	2,77E+01	4,91E+04	2,67E+01	4,36E+04	1,78E+01	7,97E+04	2,40E+01	4,91E+04	2,13E+01
4,66E+04	2,26E+01	8,28E+04	2,78E+01	5,12E+04	2,69E+01	4,66E+04	1,81E+01	8,28E+04	2,44E+01	5,12E+04	2,15E+01
5,09E+04	2,28E+01	8,45E+04	2,79E+01	5,23E+04	2,70E+01	5,09E+04	1,87E+01	8,45E+04	2,45E+01	5,23E+04	2,24E+01
5,26E+04	2,30E+01	8,59E+04	2,80E+01	5,36E+04	2,71E+01	5,26E+04	1,81E+01	8,59E+04	2,56E+01	5,36E+04	2,25E+01
5,70E+04	2,32E+01	8,72E+04	2,82E+01	5,62E+04	2,73E+01	5,70E+04	1,89E+01	8,72E+04	2,48E+01	5,62E+04	2,31E+01
6,07E+04	2,33E+01	8,95E+04	2,83E+01	5,93E+04	2,75E+01	6,07E+04	1,89E+01	8,95E+04	2,54E+01	5,93E+04	2,36E+01
6,15E+04	2,34E+01	8,98E+04	2,85E+01	6,05E+04	2,77E+01	6,15E+04	1,89E+01	8,98E+04	2,51E+01	6,05E+04	2,30E+01
6,32E+04	2,35E+01	9,26E+04	2,86E+01	6,33E+04	2,79E+01	6,32E+04	1,90E+01	9,26E+04	2,58E+01	6,33E+04	2,39E+01
6,38E+04	2,36E+01	9,41E+04	2,87E+01	6,51E+04	2,81E+01	6,38E+04	1,95E+01	9,41E+04	2,57E+01	6,51E+04	2,38E+01
6,64E+04	2,38E+01	9,52E+04	2,88E+01	6,68E+04	2,83E+01	6,64E+04	2,00E+01	9,52E+04	2,62E+01	6,68E+04	2,49E+01
6,82E+04	2,39E+01	9,72E+04	2,90E+01	6,97E+04	2,85E+01	6,82E+04	1,96E+01	9,72E+04	2,69E+01	6,97E+04	2,54E+01
7,14E+04	2,40E+01	9,94E+04	2,91E+01	7,16E+04	2,87E+01	7,14E+04	1,97E+01	9,94E+04	2,73E+01	7,16E+04	2,57E+01
7,14E+04	2,41E+01	1,00E+05	2,93E+01	7,28E+04	2,88E+01	7,14E+04	2,01E+01	1,00E+05	2,74E+01	7,28E+04	2,51E+01
7,39E+04	2,43E+01	1,01E+05	2,94E+01	7,42E+04	2,92E+01	7,39E+04	2,02E+01	1,01E+05	2,65E+01	7,42E+04	2,66E+01
7,55E+04	2,44E+01	1,03E+05	2,96E+01	7,69E+04	2,93E+01	7,55E+04	2,02E+01	1,03E+05	2,74E+01	7,69E+04	2,68E+01
7,71E+04	2,46E+01	1,05E+05	2,97E+01	7,91E+04	2,95E+01	7,71E+04	2,06E+01	1,05E+05	2,87E+01	7,91E+04	2,76E+01
8,02E+04	2,47E+01	1,07E+05	2,98E+01	7,98E+04	2,96E+01	8,02E+04	2,10E+01	1,07E+05	2,88E+01	7,98E+04	2,69E+01
8,14E+04	2,49E+01	1,07E+05	3,00E+01	8,02E+04	2,98E+01	8,14E+04	2,09E+01	1,07E+05	2,90E+01	8,02E+04	2,80E+01
8,21E+04	2,50E+01	1,09E+05	3,01E+01	8,27E+04	3,00E+01	8,21E+04	2,11E+01	1,09E+05	2,88E+01	8,27E+04	2,86E+01
8,30E+04	2,51E+01	1,09E+05	3,03E+01	8,43E+04	3,02E+01	8,30E+04	2,12E+01	1,09E+05	2,95E+01	8,43E+04	2,86E+01
8,47E+04	2,53E+01	1,11E+05	3,04E+01	8,52E+04	3,03E+01	8,47E+04	2,17E+01	1,11E+05	3,01E+01	8,52E+04	2,87E+01
8,76E+04	2,55E+01	1,13E+05	3,05E+01	8,61E+04	3,05E+01	8,76E+04	2,20E+01	1,13E+05	3,00E+01	8,61E+04	2,90E+01
8,80E+04	2,56E+01	1,14E+05	3,08E+01	8,64E+04	3,06E+01	8,80E+04	2,21E+01	1,14E+05	3,07E+01	8,64E+04	2,96E+01
8,97E+04	2,57E+01	1,15E+05	3,09E+01	8,69E+04	3,08E+01	8,97E+04	2,20E+01	1,15E+05	3,19E+01	8,69E+04	3,01E+01
9,03E+04	2,59E+01	1,17E+05	3,11E+01	8,85E+04	3,10E+01	9,03E+04	2,30E+01	1,17E+05	3,09E+01	8,85E+04	3,11E+01
9,27E+04	2,61E+01	1,18E+05	3,12E+01	8,93E+04	3,13E+01	9,27E+04	2,27E+01	1,18E+05	3,27E+01	8,93E+04	3,17E+01
9,49E+04	2,62E+01	1,19E+05	3,14E+01	9,02E+04	3,14E+01	9,49E+04	2,29E+01	1,19E+05	3,31E+01	9,02E+04	3,19E+01
9,62E+04	2,63E+01	1,20E+05	3,15E+01	9,08E+04	3,15E+01	9,62E+04	2,30E+01	1,20E+05	3,37E+01	9,08E+04	3,28E+01
9,68E+04	2,65E+01	1,21E+05	3,17E+01	9,10E+04	3,17E+01	9,68E+04	2,36E+01	1,21E+05	3,44E+01	9,10E+04	3,20E+01
9,79E+04	2,66E+01	1,22E+05	3,19E+01	9,17E+04	3,18E+01	9,79E+04	2,32E+01	1,22E+05	3,38E+01	9,17E+04	3,34E+01
9,99E+04	2,68E+01	1,24E+05	3,20E+01	9,27E+04	3,19E+01	9,99E+04	2,43E+01	1,24E+05	3,58E+01	9,27E+04	3,31E+01
1,02E+05	2,70E+01	1,24E+05	3,21E+01	9,33E+04	3,21E+01	1,02E+05	2,44E+01	1,24E+05	3,60E+01	9,33E+04	3,40E+01
1,04E+05	2,71E+01	1,25E+05	3,23E+01	9,44E+04	3,22E+01	1,04E+05	2,46E+01	1,25E+05	3,57E+01	9,44E+04	3,49E+01
1,04E+05	2,72E+01	1,26E+05	3,24E+01	9,45E+04	3,24E+01	1,04E+05	2,47E+01	1,26E+05	3,74E+01	9,45E+04	3,45E+01
1,05E+05	2,74E+01	1,27E+05	3,25E+01	9,55E+04	3,26E+01	1,05E+05	2,53E+01	1,27E+05	3,77E+01	9,55E+04	3,62E+01
1,06E+05	2,75E+01	1,27E+05	3,27E+01	9,63E+04	3,27E+01	1,06E+05	2,53E+01	1,27E+05	3,64E+01	9,63E+04	3,67E+01
1,07E+05	2,76E+01	1,27E+05	3,28E+01	9,68E+04	3,29E+01	1,07E+05	2,52E+01	1,27E+05	3,74E+01	9,68E+04	3,63E+01
1,09E+05	2,77E+01	1,28E+05	3,29E+01	9,72E+04	3,30E+01	1,09E+05	2,59E+01	1,28E+05	3,79E+01	9,72E+04	3,69E+01
1,09E+05	2,79E+01	1,29E+05	3,30E+01	9,78E+04	3,32E+01	1,09E+05	2,59E+01	1,29E+05	3,80E+01	9,78E+04	3,91E+01
1,10E+05	2,80E+01	1,29E+05	3,31E+01	9,83E+04	3,34E+01	1,10E+05	2,59E+01	1,29E+05	3,84E+01	9,83E+04	3,98E+01
1,11E+05	2,81E+01	1,30E+05	3,33E+01	9,86E+04	3,35E+01	1,11E+05	2,66E+01	1,30E+05	3,95E+01	9,86E+04	3,79E+01
1,12E+05	2,82E+01	1,31E+05	3,35E+01	9,89E+04	3,37E+01	1,12E+05	2,58E+01	1,31E+05	4,03E+01	9,89E+04	4,09E+01
1,13E+05	2,84E+01	1,32E+05	3,37E+01	9,91E+04	3,38E+01	1,13E+05	2,69E+01	1,32E+05	4,08E+01	9,91E+04	4,00E+01
1,15E+05	2,86E+01	1,32E+05	3,38E+01	9,95E+04	3,40E+01	1,15E+05	2,75E+01	1,32E+05	4,28E+01	9,95E+04	4,17E+01
1,15E+05	2,87E+01	1,33E+05	3,40E+01	9,97E+04	3,41E+01	1,15E+05	2,76E+01	1,33E+05	4,19E+01	9,97E+04	4,16E+01
1,16E+05	2,88E+01	1,33E+05	3,41E+01	1,00E+05	3,43E+01	1,16E+05	2,82E+01	1,33E+05	4,34E+01	1,00E+05	4,20E+01

1,17E+05	2,89E+01	1,34E+05	3,42E+01	1,01E+05	3,44E+01	1,17E+05	2,79E+01	1,34E+05	4,48E+01	1,01E+05	4,23E+01
1,17E+05	2,90E+01	1,34E+05	3,44E+01	1,01E+05	3,45E+01	1,17E+05	2,85E+01	1,34E+05	4,65E+01	1,01E+05	4,37E+01
1,19E+05	2,92E+01	1,34E+05	3,45E+01	1,01E+05	3,47E+01	1,19E+05	2,85E+01	1,34E+05	4,59E+01	1,01E+05	4,34E+01
1,19E+05	2,93E+01	1,35E+05	3,47E+01	1,02E+05	3,49E+01	1,19E+05	2,85E+01	1,35E+05	4,53E+01	1,02E+05	4,49E+01
1,20E+05	2,95E+01	1,36E+05	3,48E+01	1,02E+05	3,51E+01	1,20E+05	2,99E+01	1,36E+05	4,68E+01	1,02E+05	4,58E+01
1,21E+05	2,96E+01	1,36E+05	3,49E+01	1,02E+05	3,52E+01	1,21E+05	2,99E+01	1,36E+05	4,74E+01	1,02E+05	0,00E+00
1,22E+05	2,97E+01	1,36E+05	3,50E+01	1,02E+05	3,54E+01	1,22E+05	3,09E+01	1,36E+05	4,88E+01	1,02E+05	0,00E+00
1,23E+05	2,99E+01	1,37E+05	3,52E+01	1,03E+05	3,56E+01	1,23E+05	3,18E+01	1,37E+05	4,80E+01	1,03E+05	0,00E+00
1,23E+05	3,01E+01	1,37E+05	3,54E+01			1,23E+05	3,12E+01	1,37E+05	5,17E+01		
1,24E+05	3,02E+01	1,38E+05	3,55E+01			1,24E+05	3,11E+01	1,38E+05	5,04E+01		
1,25E+05	3,03E+01	1,38E+05	3,58E+01			1,25E+05	3,15E+01	1,38E+05	5,30E+01		
1,26E+05	3,05E+01	1,39E+05	3,60E+01			1,26E+05	3,25E+01	1,39E+05	5,28E+01		
1,27E+05	3,07E+01	1,39E+05	3,61E+01			1,27E+05	3,28E+01	1,39E+05	5,37E+01		
1,28E+05	3,08E+01	1,39E+05	3,62E+01			1,28E+05	3,34E+01	1,39E+05	5,40E+01		
1,28E+05	3,10E+01	1,40E+05	3,64E+01			1,28E+05	3,35E+01	1,40E+05	5,68E+01		
1,29E+05	3,12E+01	1,40E+05	3,66E+01			1,29E+05	3,40E+01	1,40E+05	5,60E+01		
1,30E+05	3,14E+01	1,40E+05	3,67E+01			1,30E+05	3,59E+01	1,40E+05	5,73E+01		
1,31E+05	3,16E+01	1,40E+05	3,68E+01			1,31E+05	3,46E+01	1,40E+05	5,79E+01		
1,32E+05	3,18E+01	1,41E+05	3,69E+01			1,32E+05	3,65E+01	1,41E+05	5,91E+01		
1,33E+05	3,19E+01	1,41E+05	3,71E+01			1,33E+05	3,76E+01	1,41E+05	6,30E+01		
1,33E+05	3,20E+01	1,41E+05	3,72E+01			1,33E+05	3,79E+01	1,41E+05	6,19E+01		
1,34E+05	3,22E+01	1,41E+05	3,73E+01			1,34E+05	3,84E+01	1,41E+05	6,27E+01		
1,34E+05	3,24E+01	1,42E+05	3,75E+01			1,34E+05	3,79E+01	1,42E+05	6,52E+01		
1,35E+05	3,26E+01	1,42E+05	3,76E+01			1,35E+05	3,94E+01	1,42E+05	6,67E+01		
1,36E+05	3,27E+01	1,42E+05	3,77E+01			1,36E+05	3,88E+01	1,42E+05	6,73E+01		
1,36E+05	3,28E+01	1,42E+05	3,78E+01			1,36E+05	3,99E+01	1,42E+05	0,00E+00		
1,37E+05	3,30E+01	1,42E+05	3,80E+01			1,37E+05	4,12E+01	1,42E+05	0,00E+00		
1,38E+05	3,31E+01	1,42E+05	3,79E+01			1,38E+05	4,17E+01	1,42E+05	0,00E+00		
1,38E+05	3,33E+01					1,38E+05	4,09E+01				
1,38E+05	3,35E+01					1,38E+05	4,28E+01				
1,39E+05	3,37E+01					1,39E+05	4,31E+01				
1,39E+05	3,38E+01					1,39E+05	4,47E+01				
1,39E+05	3,40E+01					1,39E+05	4,38E+01				
1,40E+05	3,41E+01					1,40E+05	4,57E+01				
1,40E+05	3,42E+01					1,40E+05	4,67E+01				
1,40E+05	3,43E+01					1,40E+05	4,51E+01				
1,40E+05	3,45E+01					1,40E+05	4,62E+01				
1,42E+05	3,46E+01					1,42E+05	4,98E+01				
1,42E+05	3,47E+01					1,42E+05	5,03E+01				
1,42E+05	3,50E+01					1,42E+05	0,00E+00				
1,42E+05	3,51E+01					1,42E+05	0,00E+00				
1,42E+05	3,52E+01					1,42E+05	0,00E+00				